

Doctorat de l'Université de Toulouse

préparé à l'Université Toulouse - Jean Jaurès

Prévention des risques émergents des véhicules automatisés :
Comment améliorer les capacités attentionnelles des
drivengurs ?

Thèse présentée et soutenue, le 25 octobre 2024 par
Sharon OUDDIZ

École doctorale

CLESCO - Comportement, Langage, Éducation, Socialisation, Cognition

Spécialité

Psychologie

Unité de recherche

CLLE - Unité Cognition, Langues, Langage, Ergonomie

Thèse dirigée par

Céline LEMERCIER

Composition du jury

Mme Valérie LE FLOCH, Présidente, Université Toulouse - Jean Jaurès

M. Eric BRANGIER, Rapporteur, Université de Lorraine

M. Jean-Marie BURKHARDT, Rapporteur, Université Gustave Eiffel

Mme Catherine GABAUDE, Examinatrice, Université Gustave Eiffel

M. Pierre-Vincent PAUBEL, Examineur, Université de Toulouse - Jean Jaurès

Mme Céline LEMERCIER, Directrice de thèse, Université Toulouse - Jean Jaurès

THESE

En vue de l'obtention du doctorat de l'Université de Toulouse 2 Jean-Jaurès

Présentée et soutenue par Sharon Ouddiz

Prévention des risques émergents des véhicules automatisés : Comment améliorer les capacités attentionnelles des drivengurs ?

École doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Éducation,
Socialisation, Cognition**

Spécialité : **Psychologie**

Unité de recherche :

CLLE - Unité Cognition, Langues, Langage, Ergonomie

Thèse dirigée par

Céline LEMERCIER

Jury :

M. Eric BRANGIER, Rapporteur

M. Jean-Marie BURKHARDT, Rapporteur

Mme Catherine GABAUDE, Examinatrice

Mme Valérie LE FLOCH, Examinatrice

Mr Pierre-Vincent PAUBEL, Examineur

Mme Céline LEMERCIER, Directrice de thèse

REMERCIEMENTS

J'ai rencontré Céline Lemercier quand je suis arrivée en première année de Master psychologie. Je lui ai demandé d'être ma directrice de recherche dans le cadre de mon mémoire de M1. Elle m'a tout de suite répondu, et nous nous sommes rencontrées. Après avoir lu plusieurs de ses articles, je lui ai proposé de travailler sur les émotions véhiculées par la musique, et leur impact sur la conduite automobile. Céline a tout de suite accepté. Elle m'a appris à développer une recherche, du développement du protocole jusqu'à la rédaction d'un article. Elle m'a aidé à préparer mes soutenances de mémoire, mes présentations à des conférences. Ce mémoire était très difficile pour une première recherche, mais il m'a également beaucoup apporté, et notamment donné l'envie de poursuivre vers un master recherche et un doctorat.

Je tiens donc à remercier tout d'abord Céline Lemercier pour m'avoir accompagné dans la découverte du monde de la recherche, dans son aide, son implication et sa direction depuis ma première année de master, à travers les deux mémoires de recherche et cette présente thèse. Je la remercie de m'avoir fait confiance, et donné l'opportunité de présenter mes travaux de recherche à l'étranger, même avant mon entrée en thèse. Je la remercie pour sa réactivité constante durant toutes ces années, sa rigueur et ses exigences. Je souhaite la remercier pour son aide primordiale à la préparation du concours CDU, qui m'a permis d'obtenir un financement de thèse. Enfin, merci à elle pour son soutien et sa patience durant toutes ces années, même dans les moments les plus difficiles.

J'ai rencontré Pierre-Vincent Paubel lors de ma première visite du simulateur de conduite à la plateforme CCU, avec Céline Lemercier. Durant cette première année de Master, il m'a apporté son aide dans l'apprentissage du recrutement de participants et la conduite des

passations expérimentales. Pierre m'a appris à utiliser le simulateur et à concevoir des scénarios sur notre super logiciel très « intuitif ». Il m'a également appris à utiliser et à traiter les données relatives à l'ensemble des mesures comportementales et physiologiques utilisées dans le cadre de cette thèse. Je tiens donc à remercier Pierre-Vincent Paubel, sans qui je ne serais probablement pas arrivée jusqu'ici. Je le remercie pour son aide précieuse depuis ma première année de Master, ses conseils avisés, sa disponibilité et sa patience. Je le remercie d'avoir été le moteur de toutes les recherches que nous avons mené au simulateur de conduite. Enfin, un grand merci à lui de m'avoir soutenu durant toutes ces années.

Je tiens à remercier les membres du laboratoire CLLE de m'avoir accueilli dans notre laboratoire et de m'avoir permis de réaliser ces travaux de recherche. Merci à la Maison des Hommes, des Sciences et de la Société de Toulouse (MSHS-T) de m'avoir donné l'opportunité de réaliser mes travaux à la plateforme CCU, en particulier au simulateur de conduite.

Merci à tous les membres du TIMH-LAB, titulaires, doctorants et post-doctorants. Leur aide et leur soutien durant toutes ces années m'ont permis d'avancer dans mes recherches et de mener ma thèse jusqu'au bout. Un grand merci à Loïc Carroux qui m'a beaucoup aidé dans mes recherches. Merci à Maxime et Noé pour l'aide, les conseils et le soutien qu'ils m'ont apporté. Merci à eux d'avoir été là lors de la conférence EPIQUE, où nous avons tous les trois remporté un prix ! Merci à Noé et Eugénie pour leur aide et leur présence durant la conférence AHFE à New-York, et pour notre petit voyage prolongé dans cette superbe ville.

Je tiens à remercier Valérie Lefloch et Catherine Gabaude d'avoir accepté de suivre mon parcours et mes recherches au sein du comité de suivi. Merci pour leur aide précieuse et leurs conseils. Un grand merci à elles d'avoir accepté d'être examinatrice de ma thèse. Un grand merci également à Jean-Marie Burkhardt et Eric Brangier d'avoir accepté de suivre mon travail en acceptant d'être examinateur de ma thèse.

Merci à Pascal Gaillard d'avoir accepté de faire partie de mon jury de mémoire de M1, qui a été un tremplin pour la suite de mes recherches.

Enfin, je tiens à remercier tous mes proches, ma famille et mes amis, pour m'avoir soutenu durant toutes ces années et m'ont permis d'aller jusqu'au bout de ce travail de thèse.

RÉSUMÉ

En supprimant le facteur humain de la conduite, l'automatisation des véhicules prévoit de diminuer la mortalité routière. Cependant, les véhicules automatisés actuels et futurs ne retirent que partiellement l'humain de la boucle de la conduite. Avec un véhicule automatisé de niveau 3, l'humain pourra s'engager dans diverses tâches annexes mais devra être capable de reprendre le volant en cas d'inopérabilité du système. Ce retrait partiel de l'humain est problématique, les *drivengers* (contraction de conducteur et de passager) ont des comportements à risques lorsqu'ils doivent reprendre le contrôle de leur véhicule après un trajet automatisé de niveau 3. Plusieurs explications sont apportées dans la littérature, comme l'effet « out-of-the-loop » : retirer l'humain de la boucle de la conduite impacterait ses capacités à réacquérir une conscience de la situation optimale après la reprise, expliquant ses comportements inadaptés. Les modèles du switch attentionnel expliquent ces performances altérées par le coût du switch entre la tâche annexe et la conduite, imposé lors de la reprise. Le modèle MART propose une explication basée sur la dynamique malléable des ressources attentionnelles : ces performances détériorées seraient la conséquence du rétrécissement des ressources disponibles, en réponse à la sous-charge mentale expérimentée durant le mode automatisé. L'objectif principal de cette thèse est de mieux comprendre la cause des performances dégradées observées chez les *drivengers* lors de la reprise, et des facteurs pouvant les impacter. Dans la mesure où l'expertise routière se développe avec la pratique, les *drivengers* de demain n'atteindront peut-être jamais un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires. Ainsi, nos études se sont intéressées à l'étude des comportements des novices lors de la reprise.

La première étude montre que la moitié des individus a une perception inadéquate de la reprise, percevant celle-ci comme trop facile ou difficile. La deuxième étude évalue le

comportement visuo-attentionnel des drivengers durant la préparation à la reprise en fonction de leur expertise routière. Les résultats montrent des comportements visuo-attentionnels particulièrement altérés chez les drivengers novices en comparaison aux experts et à leurs homologues conducteurs. La troisième étude a pour objectif de mieux comprendre la cause des comportements visuo-attentionnels altérés, en particulier chez les novices, en évaluant leur fréquence de switch attentionnel. Les résultats montrent que les novices ont une fréquence de switch deux fois plus élevée que les experts, pouvant expliquer leurs performances dégradées. Enfin, la dernière étude évalue le modèle MART comme modèle explicatif des difficultés des drivengers à reprendre la conduite manuelle. Les résultats montrent que s'engager dans une tâche annexe exigeante durant le mode automatisé préserve les comportements lors de la reprise, alors qu'une tâche annexe peu exigeante, associée à un état de sous-charge, engendre un rétrécissement des ressources attentionnelles disponibles et des performances de reprise dégradées. L'effet négatif de la sous-charge mentale impacte particulièrement les novices, la différence entre ressources attentionnelles disponibles et requises pour la tâche de reprise étant plus important que pour les experts. Les résultats des quatre études sont discutés au regard des modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles et du switch attentionnel.

ABSTRACT

By removing the human factor from driving, vehicle automation aims to reduce road mortality. However, current and future automated vehicles only partially remove humans from the driving loop. With a level 3 automated vehicle, humans can engage in various Non-Driving-Related Tasks (NDRT) but must be capable of taking over the wheel if the system fails. This partial removal of humans poses problems; "drivengers" (contraction of driver and passenger) exhibit risky behaviors when they must regain control after a level 3 automated journey. Several explanations are offered in the literature, such as the "out-of-the-loop" effect: removing humans from the driving loop impacts their ability to regain optimal situational awareness upon takeover, explaining their inappropriate behaviors. Attention switch models explain these impaired performances due to the cost of switching between the NDRT and the driving task during takeover. The MART model proposes an explanation based on the malleable dynamics of attentional resources: degraded performances result from the narrowing of available resources in response to mental underload experienced during automated mode. The main goal of this thesis is to better understand the causes of degraded performances observed in drivengers during takeover and the factors influencing them. Given that driving experience develops with practice, future drivengers may never achieve sufficient expertise for safe driving behaviors. Therefore, our studies focus on novice behaviors during takeover.

The first study shows that half of the individuals have an inadequate perception of takeover, perceiving it as either too easy or difficult. The second study evaluates the visuo-attentional behavior of drivengers during preparation for takeover based on their driving experience. Results indicate significantly impaired visuo-attentional behaviors among novice drivengers compared to experts and their drivers' counterparts. The third study aims to better understand the cause of impaired visuo-attentional behaviors, especially among novices, by

evaluating their attentional switch frequency. Results show novices have twice the switch frequency compared to experts, potentially explaining their degraded performances. Finally, the last study evaluates the MART model as an explanatory model for the difficulties drivers experience during takeover. Findings indicate engaging in a demanding NDRT during automated drive preserves takeover behaviors, while engaging in low demanding NDRT (mental underload), narrows available attentional resources and degrades takeover performances. The negative impact of mental underload particularly affects novices, with a greater gap between available and required attentional resources for the takeover task compared to experts. Results from all four studies are discussed in relation to models of situational awareness, attentional resources, and attentional switching.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIÈRES	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
PARTIE THÉORIQUE	15
1. LA CONDUITE AUTOMOBILE	15
1.1. Le modèle de Michon	16
1.2. Le modèle de Rasmussen	17
1.3. Liens entre les deux modèles	18
1.4. Les points clés sur la conduite automobile	19
2. LA CONDUITE AUTOMATISÉE	20
2.1. Les niveaux d'automatisation.....	20
2.2. Le niveau 3 d'automatisation	23
2.2.1. Modèle descriptif de l'activité de conduite automatisée de niveau 3	24
2.3. Bénéfices attendus et risques émergents de l'automatisation de la conduite	26
2.4. Les points clés sur la conduite automatisée.....	29
3. LES MODELES EXPLICATIFS DES PERFORMANCES DE REPRISE DEGRADÉES.....	29
3.1. Conscience de la situation et effet « out-of-the-loop »	30
3.1.1. Le modèle des trois niveaux de conscience de la situation (Endsley, 1995)	30
3.1.2. Relation entre la conscience de la situation et la charge mentale	33
3.1.3. Relation entre la conscience de la situation et l'effet out-of-the-loop	34
3.2. Les modèles des ressources attentionnelles.....	37
3.2.1. L'attention en tant que réservoir de ressources fixes	37
3.2.2. L'attention en tant que réservoir de ressources malléables	39
3.3. Orientation de l'attention et task switching.....	43
3.3.1. Le modèle du contrôle attentionnel de Posner (1980, 1988).....	43
3.3.2. L'alternance entre tâche ou task-switching.....	45
3.4. Les points clés sur les modèles explicatifs des performances de reprise dégradées	47
4. FACTEURS IMPACTANT LES COMPORTEMENTS DES CONDUCTEURS ET DES DRIVENGERS	48
4.1. L'engagement au sein d'une tâche annexe	48
4.2. Le niveau d'expertise routière.....	51
4.3. Les points clés sur les facteurs impactant les comportements des conducteurs et des drivengers	54
5. OBJECTIFS ET OVERVIEW DE LA THESE	54
PARTIE EMPIRIQUE	57
CHAPITRE 1 IMPACT DES FACTEURS RELATIFS A LA TÂCHE ET A LA SITUATION SUR LA DIFFICULTÉ PERÇUE DE LA REPRISE.	58
1. Introduction au chapitre	58
2. Résumé de l'étude	59
3. Article 1: How difficult is it perceived to takeover in a level 3 automated vehicle? Investigation of the ease of use according to task and situational factors	62

4. Les points clés sur le chapitre 1.....	99
CHAPITRE 2 COMMENT LES DRIVENGERS SE PREPARENT-ILS A REPENDRE LE VOLANT ? EFFET DU NIVEAU D'EXPERTISE ROUTIERE SUR LEUR COMPORTEMENT VISUO-ATTENTIONNEL.	100
1. Introduction au chapitre	100
2. Résumé de l'étude	101
3. Article 2: How do novice and expert drivers prepare for takeover when they are drivengers of a level 3 autonomous vehicle? Investigation of their visual behaviour	104
4. Les points clés sur le chapitre 2.....	133
CHAPITRE 3 REPRISE DE LA CONDUITE ET SWITCH ATTENTIONNEL : VERS UNE EXPLICATION DES PERFORMANCES DEGRADEES CHEZ LES NOVICES.	134
1. Introduction au chapitre	134
2. Résumé de l'étude	135
3. Article 3: How do novice and expert drivers prepare to takeover? Investigation of their visual and task switching behaviour	138
4. Les points clés sur le chapitre 3.....	163
CHAPITRE 4 COMMENT AMELIORER LES CAPACITES DES DRIVENGERS A REPENDRE LE VOLANT ? IMPACT DES CARACTERISTIQUES DE LA TACHE ANNEXE CHEZ LES CONDUCTEURS NOVICES ET EXPERTS.	164
1. Introduction au chapitre	164
2. Résumé de l'étude	165
3. Article 4: How to enhance performance and attentional capacity of drivengers in level 3 automated driving? Impact of Non-Driving-Related Task (NDRT) demand and level of driving experience.	168
4. Les points clés sur le chapitre 4.....	226
DISCUSSION GÉNÉRALE	227
1. OBJECTIFS, ACTIONS DE RECHERCHE ET RESULTATS PRINCIPAUX	227
2. LA REPRISE DE L'ACTIVITE DE CONDUITE, UN PROCESSUS COUTEUX IMPLIQUANT UNE REORIENTATION ATTENTIONNELLE	233
3. VALIDATION EMPIRIQUE DU MODELE MART DES RESSOURCES ATTENTIONNELLES MALLEABLES	236
4. SYNTHÈSE DES FACTEURS IMPACTANT LES PERFORMANCES DE REPRISE	238
4.1. L'engagement dans une NDRT	238
4.2. Le niveau d'expertise routière.....	241
4.3. Conclusion au regard de l'impact des facteurs sur les performances de reprise	246
5. CONTRIBUTIONS METHODOLOGIQUES	247
6. LIMITES ET PERSPECTIVES	251
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	257
RÉFÉRENCES.....	260

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En 1478, Léonard De Vinci imaginait un chariot capable de se déplacer sur deux roues, à l'aide de ressorts, intégrant même un système de direction et de freinage (Heudin, 2008). Il ne s'arrêta pas à cette première esquisse des véhicules, tels que nous les connaissons aujourd'hui, mais alla jusqu'à imaginer un véhicule capable de conduire en autonomie sur une trajectoire prédéterminée et sans émission de CO₂. Un demi-millénaire plus tard, nous poursuivons l'un des rêves de Léonard De Vinci à travers l'automatisation progressive des véhicules. Aujourd'hui, l'objectif des constructeurs et équipementiers automobiles est d'atteindre un niveau d'automatisation totale, soit des véhicules autonomes de niveau 5 (sur les 6 niveaux définis par la Society of Automotive Engineers, (Society of Automotive Engineers SAE, 2021). Ces véhicules seraient capables de conduire en autonomie totale, sans jamais nécessiter d'intervention humaine.

Plusieurs bénéfices sont attendus de l'émergence et l'adoption de ce moyen de transport. Aujourd'hui, la première cause des accidents est attribuée à une « erreur humaine », causée par un déficit attentionnel du conducteur par rapport à la tâche de conduite (Dingus et al., 2006; Lemercier & Cellier, 2008; Singh, 2015; K. Young & Regan, 2007). Ainsi, l'automatisation totale de la conduite prévoit de diminuer jusqu'à 90% les accidents de la route en supprimant l'humain de la boucle de la conduite (Bertoncello & Wee, 2015). D'autres bénéfices sont attendus, en termes d'écologie (Anderson et al., 2014) et de confort (Novak, 2007). Contrairement aux bénéfices relatifs à la diminution des accidents et de la pollution attendus d'une automatisation totale et généralisée, la libération de temps à consacrer à d'autres activités est, dès à présent, observable avec les véhicules automatisés de niveau 3 (Society of Automotive Engineers SAE), 2021). Ces véhicules sont capables de prendre entièrement en charge le contrôle latéral et longitudinal du véhicule, dans certaines situations uniquement. Désormais,

drivenger (i.e., contraction de driver et de passenger, terme désignant le double statut de conducteur et de passager des utilisateurs des véhicules automatisés de niveau 3), l'humain derrière le volant se voit libéré de son rôle de conducteur lorsque le système automatisé est activé, lui offrant la possibilité de réaliser les activités qu'il souhaite. C'est par exemple le cas des utilisateurs des véhicules Mercedes dotés du système DRIVE PILOT qui sont autorisés à ne plus superviser la conduite lorsque le système est activé. Autorisé en France et en Allemagne depuis 2022, cette particularité du niveau 3 ne peut jusqu'à présent être utilisée que sur les rocade ou les voies d'autoroute et à une vitesse maximale de 60 km/h, correspondant à des situations de ralentissement généralisé du trafic et d'embouteillages. Le drivenger devra cependant être capable de reprendre la conduite manuelle lorsque les limites du système et/ou la législation, concernant son utilisation, sont atteintes.

Reprendre la conduite après un trajet en conduite automatisée s'avère être une tâche difficile, où les risques accidentels sont accrus par rapport à une situation de conduite manuelle. La littérature s'accorde à dire que reprendre la conduite après un trajet automatisé est une tâche complexe où les performances des drivengers sont détériorées, en comparaison avec un contexte de conduite non-automatisée. La littérature reste cependant divergente en ce qui concerne les processus psychologiques mis en cause (Navarro, 2019). La première hypothèse repose sur les modèles de la conscience de la situation (Endsley, 1995). Elle stipule que le fait de retirer l'humain de la boucle de la conduite, lorsqu'il s'engage au sein d'une tâche annexe ou NDRT (Non-Driving-Related Task), expliquerait la conscience de la situation détériorée des drivengers, lors de la reprise, et les performances dégradées résultantes. La deuxième hypothèse repose sur les modèles des ressources attentionnelles multiples et fixes (Wickens, 2008). Ici, les performances détériorées seraient expliquées par la surcharge d'un des réservoirs de ressources attentionnelles dans la mesure où la reprise est une tâche exigeante. Cependant, la littérature s'accorde sur le fait que les drivengers expérimentent un état de sous-charge mentale

durant le mode automatisé (De Winter et al., 2014). De ce constat, découle la troisième hypothèse sur laquelle repose la présente thèse : le modèle MART des ressources attentionnelles malléables (M. S. Young & Stanton, 2002a, 2002b, 2007, 2020). Selon ce modèle, une dégradation des performances est attendue en cas de surcharge mais également en cas de sous-charge mentale. Ainsi, la sous-charge serait accompagnée d'un rétrécissement artificiel des ressources attentionnelles disponibles, en réponse aux faibles exigences de la tâche. Lorsque les exigences de la tâche augmentent soudainement lors de la reprise, les drivengers ne disposeraient pas de suffisamment de ressources attentionnelles afin de répondre aux exigences de la tâche. Ceci engendrerait une détérioration de la conscience de la situation et des performances observées lors de la reprise. Toujours selon ce modèle, les capacités attentionnelles nécessiteraient un temps d'adaptation afin de se réajuster à la demande de la tâche et atteindre un niveau optimal. Finalement, la quatrième et dernière hypothèse stipule que les performances détériorées sont le résultat du coût du switch, c'est-à-dire des ressources exigées par le switch attentionnel réalisé entre la NDRT et la reprise de la tâche de conduite (Monsell, 2003). Bien que ces quatre hypothèses s'appuient sur des processus psychologiques distincts, ils apparaissent néanmoins compatibles et indissociables. Ainsi, la présente thèse s'efforcera d'intégrer l'ensemble de ces processus psychologiques afin de mieux comprendre les comportements des drivengers en conduite automatisée de niveau 3 dans leur globalité, dans une perspective de prévention des risques émergents de cette nouvelle technologie.

L'objectif général de cette thèse était de mieux comprendre l'activité de conduite automatisée de niveau 3 et les processus psychologiques sous-jacents, dans une perspective de prévention des risques émergents de cette nouvelle technologie. De cet objectif général découlait quatre sous-objectifs. Le premier était de mieux comprendre les processus cognitifs intervenants dans l'activité de conduite automatisée de niveau 3, et plus généralement apporter aux modèles de l'attention en psychologie une meilleure compréhension de la dynamique des

ressources attentionnelles. Le deuxième objectif était d'évaluer l'impact de facteurs internes et externes à l'individu sur les capacités à reprendre la conduite. Nous nous sommes ici particulièrement focalisés sur deux facteurs peu étudiés mais pourtant majeurs : le niveau d'expertise routière et la demande relative à la tâche annexe. Notre troisième objectif était d'apporter des préconisations quant aux moyens de réduire les risques présents lors de la reprise, notamment à travers l'évaluation de l'impact de la demande relative à la tâche annexe menée durant le mode automatisé. Finalement, notre quatrième et dernier objectif était de proposer un modèle unifié du comportement des drivengers, en conduite automatisée de niveau 3, en intégrant les modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles multiples, des ressources attentionnelles malléables et du switch attentionnel.

Nous débuterons le cadre théorique par définir la tâche de conduite manuelle au regard des modèles développés autour du facteur humain (voir partie 1). Nous aborderons dans une seconde partie la conduite automatisée en explicitant les niveaux d'automatisation, les modèles descriptifs de cette tâche nouvelle pour l'humain et finalement les bénéfices et les risques attendus de l'automatisation. Dans la troisième partie, nous développerons les modèles permettant d'expliquer les processus psychologiques intervenant dans la reprise de la tâche de conduite, et permettant d'expliquer les performances dégradées rapportées lors de la reprise de la conduite. Nous aborderons ici les performances dégradées au regard des modèles de la conscience de la situation, des modèles des ressources attentionnelles ainsi qu'au regard des modèles de l'orientation et du switch attentionnel. Finalement, la dernière partie de ce cadre théorique concernera l'impact des facteurs internes et externes à l'individu, identifiés comme ayant un impact majeur sur les performances de reprise des drivengers.

PARTIE THÉORIQUE

1. La conduite automobile

Que ce soit pour aller au travail, faire les courses ou encore partir en vacances, la voiture est aujourd'hui le moyen de déplacement principal. Comme le rapporte l'Insee Focus (2019), 7 salariés français sur 10 utilisent leur voiture pour aller au travail. Cette tâche quotidienne pouvant paraître simple et banale s'avère être en réalité complexe.

La conduite est une activité principalement visuo-motrice (Sivak, 1996), se déroulant à la fois dans le véhicule mais également dans un environnement routier dynamique, où l'attention du conducteur joue un rôle majeur dans la formation de sa conscience de la situation. Celle-ci correspond à la perception des éléments de l'environnement routier dynamique (Cellier, 1996), leur compréhension et leur projection dans un état futur, ceci afin de former une représentation optimale de la situation routière rencontrée et l'identification des risques potentiellement présents (Endsley, 1988, 1995). Ainsi, un défaut de l'attention peut mener le conducteur à une mauvaise conscience de la situation, ce qui est reconnu comme la principale cause des accidents de la route (Dingus et al., 2006; Lemercier & Cellier, 2008; ONISR, 2022; Singh, 2015; K. Young & Regan, 2007).

L'activité de conduite est composée de trois tâches principales : le guidage, la navigation et l'identification des risques (Stanton et al., 2001). Le guidage correspond à la composante motrice de la conduite. Le conducteur va agir sur le contrôle latéral et longitudinal de son véhicule par les actions qu'il va mener (i.e., volant, pédales, levier de vitesse). Ces actions pourront être ajustées en fonction des retours ou feedbacks qu'il percevra dans son véhicule et dans l'environnement routier. La tâche de navigation va être réalisée avec les feedbacks perçus à plus long terme, en fonction de la position du véhicule sur le trajet

prédéterminé. Finalement, la tâche d'identification des risques correspond à la perception des éléments potentiellement dangereux dans l'environnement routier. Ainsi, la conscience de la situation que va se former le conducteur va directement impacter les actions de guidage du véhicule ainsi que les potentielles erreurs commises, pouvant mener le conducteur à un accident de la route. L'activité de conduite peut également être définie à travers une composante hiérarchique, classifiant les tâches relatives à la conduite (Michon, 1985) ou les processus cognitifs intervenant dans la réalisation de ces tâches (Rasmussen, 1983).

1.1. Le modèle de Michon

En 1985, Michon développa le modèle de l'activité de conduite, hiérarchisant les tâches relatives à la conduite sur 3 niveaux : opérationnel, tactique et stratégique.

Le niveau opérationnel correspond au guidage du véhicule, aux actions que le conducteur va mener sur le volant, les pédales et le levier de vitesse afin de maintenir sa position latérale et longitudinale. Ce niveau est le moins coûteux en ressources cognitives, particulièrement pour les conducteurs expérimentés ayant automatisés les tâches relatives à ce niveau. Étant donné que ce niveau dépend directement de l'environnement routier dynamique, ces tâches sont associées à une forte pression temporelle.

Le niveau tactique correspond aux manœuvres de conduite que le conducteur va décider d'entreprendre. Par exemple, effectuer un dépassement ou encore s'arrêter pour céder le passage sont des tâches s'inscrivant dans le niveau tactique. Ces tâches sont plus exigeantes en termes de ressources cognitives, tout en exerçant une pression temporelle élevée puisque la prise de décision est faite quelques secondes avant la réalisation de l'action.

Le niveau stratégique est le niveau exigeant le plus de ressources cognitives, mais exerçant le moins de pression temporelle sur le conducteur. Ce niveau correspond aux tâches relatives à la planification de l'itinéraire d'un point A à un point B, en fonction de ses contraintes (e.g., risques, coût, temps de trajet, arrêts nécessaires).

1.2. Le modèle de Rasmussen

En 1983, Rasmussen développa le modèle SRK (Skills-Rules-Knowledge ou Habiletés-Règles-Connaissances en français) de contrôle de l'activité. En se focalisant sur les processus cognitifs sous-jacents des comportements au volant plutôt que sur la hiérarchisation des tâches de conduite, ce modèle apporte une autre dimension à la hiérarchisation de l'activité de conduite.

Les comportements basés sur des habiletés sont hautement automatisés, c'est-à-dire qu'ils vont se mettre en place sans contrôle conscient. En conduite, ils correspondent au niveau opérationnel définis par Michon (1985), c'est-à-dire que le contrôle latéral et longitudinal du véhicule, se réalisant par les actions du conducteur sur son volant, ses pédales et son levier de vitesse, vont se faire de manière automatisée et non-consciente. Ces comportements basés sur les habiletés vont être acquises au fur et à mesure de l'expérience de conduite.

Les comportements basés sur les règles, plus coûteux en ressources cognitives que ceux basés sur les habiletés, correspondent aux comportements basés sur l'application de règles ou procédures apprises avec son expérience. Contrairement aux comportements basés sur les habiletés, ceux basés sur les règles peuvent être transmis du fait de la conscience que le conducteur a de ce comportement. En conduite, ces comportements correspondent par exemple à une procédure de changement de voie suite à l'arrêt d'un véhicule sur la bande d'arrêt

d'urgence. Avec la pratique, ces comportements peuvent s'automatiser et devenir des habiletés, ce qui est reflété par le caractère non-conscient du conducteur, après avoir réalisé ce comportement.

Les comportements basés sur les connaissances interviennent lorsque le conducteur ne dispose ni d'habileté, ni de règle afin de répondre aux exigences requises par la situation rencontrée. C'est le niveau le plus coûteux en termes de ressources. Ces comportements vont être majoritairement utilisés par des conducteurs inexpérimentés, mais peuvent également être mis en place chez des experts lorsqu'ils rencontrent une situation nouvelle.

1.3. Liens entre les deux modèles

Nous avons vu que la conduite est une activité complexe intégrant une multitude de tâches et de comportements plus ou moins coûteux en ressources. Ces deux modèles s'avèrent être complémentaires dans la mesure où chaque niveau du modèle de Michon s'entrecroise avec ceux du modèle de Rasmussen. Un exemple des liens existants entre chaque niveau a été élaboré par Hale, Stoop et Hommels en 1990 (cf. Table 1 ci-dessous). Par exemple, le contrôle de la trajectoire du véhicule va correspondre au niveau opérationnel du modèle de Michon (1985), et est un comportement basé sur les habiletés selon le modèle de Rasmussen (1983).

Table 1. Illustration des liens fait par Hale, Stoop et Hommels (1990) entre les trois niveaux du modèle de l'activité de conduite de Michon (1985) et des trois niveaux de contrôle de l'activité de conduite de Rasmussen (1983).

	Niveau opérationnel	Niveau tactique	Niveau stratégique
Habiletés	Contrôle de la trajectoire	Prendre une intersection familière	Conduire sur un itinéraire familier
Règles	Conduire un véhicule non-familier	Dépasser un véhicule	Choisir un itinéraire parmi des itinéraires familiers
Connaissances	Conduire un véhicule pour la première fois	Contrôler un dérapage	Conduire sur une nouvelle route

1.4. Les points clés sur la conduite automobile

- Les modèles de Michon (1985) et de Rasmussen (1983) sont des modèles majeurs dans l'étude du comportement des conducteurs en psychologie. Ils permettent de mieux comprendre ce qu'est la conduite automobile en hiérarchisant les tâches ou les comportements.
- Cette compréhension est nécessaire à l'étude des facteurs pouvant impacter les performances de conduite. Par exemple, il est important d'identifier les tâches et comportements coûteux chez les novices afin d'adapter la conduite et son apprentissage ainsi que de favoriser le développement des habiletés.

- Avec le changement progressif de l'activité de conduite par le développement des véhicules automatisés, il apparaît nécessaire de réviser les modèles de Michon et Rasmussen ou de développer de nouveaux modèles de l'activité de conduite en fonction des niveaux d'automatisation.

2. La conduite automatisée

2.1. Les niveaux d'automatisation

Un véhicule automatisé est un véhicule doté d'un système capable de prendre en charge de manière autonome une ou plusieurs tâches relatives à l'activité de conduite. Plus un véhicule sera capable de prendre en charge un nombre de tâches élevé et nécessitant un haut niveau de ressources cognitives, plus le niveau d'automatisation du véhicule sera élevé. La durée et la diversité de situations routières où ces tâches pourront être prises en charge par le système va également déterminer le niveau d'automatisation du véhicule. A partir de cela, la Society of Automotive Engineers (SAE 2016) a élaboré depuis 2014 la taxonomie des 6 niveaux d'automatisation de la conduite la plus utilisée aujourd'hui (voir Figure 1 ci-dessous).

Le niveau 0 : Les véhicules n'intégrant pas de système automatisé. Ce niveau correspond donc aux véhicules non-automatisés, où le conducteur prend en charge toutes les tâches de conduite.

Le niveau 1 : Les véhicules intégrant un système d'aide à la conduite. Ce premier niveau d'automatisation de la conduite correspond à la prise en charge par le système du contrôle latéral ou longitudinal de la conduite. On retrouve ici par exemple le régulateur de vitesse adaptatif (ACC, Adaptive Cruise Control) permettant de prendre en charge le contrôle longitudinal du véhicule (i.e., vitesse, accélération et freinage) lorsqu'il est activé. Le

conducteur doit cependant prendre en charge le contrôle latéral du véhicule ainsi que la supervision de l'activité de conduite.

Le niveau 2 : Les véhicules intégrant un système d'automatisation partielle. A ce niveau, le système est capable de prendre en charge le contrôle longitudinal et latéral de la conduite dans certaines situations uniquement (e.g., sur autoroute), toujours sous la supervision du conducteur. Ce dernier devra reprendre le contrôle du véhicule lorsque les limites du système sont atteintes. C'est par exemple le cas du système *Autopilot* de Tesla sortie en 2015 où le conducteur doit en permanence garder les mains sur le volant et réagir face à des événements imprévus.

Le niveau 3 : Les véhicules intégrant un système d'automatisation conditionnelle. C'est le niveau le plus élevé que nous pouvons trouver aujourd'hui. A ce niveau, l'ensemble des tâches relatives à la conduite sont prises en charge et ce, dans davantage de situations routières et pour des périodes temporelles plus étendues. Ce niveau est le premier où le rôle du conducteur est réellement modifié. Celui-ci exerce le double rôle de conducteur et passager (i.e., drivengers, contraction de driver et passenger, terme utilisé en anglais pour désigner les utilisateurs des véhicules automatisés de niveau 3 ; Lemercier, 2022) En effet, la surveillance de l'activité de conduite n'est plus requise à ce niveau d'automatisation. Le conducteur peut alors se désengager totalement de l'activité de conduite et s'engager dans les activités de son choix. Il devra cependant reprendre la conduite manuelle lorsque le système n'est plus en mesure de prendre en charge la conduite. Ceci peut se produire lorsque les limites du système sont atteintes (par exemple lors d'une météo défavorable ou dans un environnement urbain trop complexe). Ceci peut également se produire lorsque la législation en place ne permet pas d'utiliser ce type de système dans certaines situations. Par exemple, les Mercedes intégrant le système de niveau 3 *DRIVE PILOT* ne sont autorisés que depuis 2022 en France et en Allemagne dans des situations très restreintes. Pour le moment, le système peut être utilisé mais

uniquement à une vitesse maximale de 60 km/h sur des routes comprenant un terre-plein central et interdite aux piétons et cyclistes (e.g., situation d'embouteillage sur la rocade). Le système alerte le drivenger de la désactivation prochaine du mode autonome, dans un délai prédéfini (i.e., 10 secondes pour la Mercedes intégrant le *DRIVE PILOT*, avec une alerte multimodale visuelle et auditive ; Mercedes me media, 2022). Pour ce véhicule, si le conducteur ne reprend pas la conduite après 10 secondes, le système contrôlera le véhicule jusqu'à son arrêt, enclenchera les feux de détresse. Il activera également l'appel d'urgence et déverrouillera les portes du véhicule.

Le niveau 4 : Les véhicules intégrant un système d'automatisation élevée. Le système intégré aux véhicules de niveau 4 est capable de prendre entièrement en charge la conduite, dans des situations plus diverses qu'au niveau 3 et pour de plus longues durées. Ici, le rôle de l'humain tend davantage vers celui de passager dans la mesure où le système est capable de mettre le véhicule et ses passagers en sécurité quand les limites du système sont atteintes. L'humain n'est donc plus dans l'obligation de reprendre l'activité de conduite en cas de désactivation du mode automatisé. Il n'est également plus obligé d'être sur le siège du conducteur.

Le niveau 5 : Les véhicules intégrant un système d'automatisation totale. A ce niveau, l'humain est passager du véhicule qui conduit en autonomie totale, dans toutes les situations et sans limite temporelle. Il n'est plus nécessaire que le véhicule soit doté d'un volant et de pédales. Comme au niveau 5, la seule tâche que l'humain réalisera sera le choix de l'itinéraire.

Figure 1. Les 6 niveaux d'automatisation définis par la SAE (2016). Tiré du Conseil canadien des administrateurs en transport motorisé, *Livre blanc : Les véhicules automatisés au Canada*, 30 novembre 2016, p. 7.

Niveau	Nom	Définition	Direction, accélération et décélération	Surveillance de l'environnement de conduite	Manœuvres de conduite dynamique	Fonctions (modes de conduite)
Le conducteur surveille l'environnement de conduite						
0	Aucune automatisation	Le conducteur contrôle tous les aspects de la conduite dynamique, même lorsque le véhicule est muni de systèmes d'avertissement ou d'intervention.	Conducteur	Conducteur	Conducteur	S. O.
1	Aide à la conduite	Un système d'aide à la conduite contrôle les fonctions de direction ou d'accélération/décélération en utilisant des données sur l'environnement de conduite. Le conducteur doit exécuter toutes les autres manœuvres de conduite dynamique.	Conducteur et système	Conducteur	Conducteur	Certains modes de conduite
2	Automatisation partielle	Un ou plusieurs systèmes d'aide à la conduite contrôlent à la fois les fonctions de direction et d'accélération/décélération en utilisant des données sur l'environnement de conduite. Le conducteur doit exécuter toutes les autres manœuvres de conduite dynamique.	Système	Conducteur	Conducteur	Certains modes de conduite
Le système de conduite automatisé (« système ») surveille l'environnement de conduite						
3	Automatisation conditionnelle	Un système de conduite automatisé contrôle tous les aspects de la conduite dynamique, et l'on s'attend à ce que le conducteur réagisse de manière appropriée lorsqu'il lui est demandé d'intervenir.	Système	Système	Conducteur	Certains modes de conduite
4	Automatisation élevée	Un système de conduite automatisé contrôle tous les aspects de la conduite dynamique, même lorsque le conducteur ne réagit pas de manière appropriée lorsqu'il lui est demandé d'intervenir.	Système	Système	Système	Certains modes de conduite
5	Automatisation complète	Un système de conduite automatisé contrôle en tout temps tous les aspects de la conduite dynamique dans toutes les conditions routières et environnementales gérables par un conducteur humain.	Système	Système	Système	Tous les modes de conduite

2.2. Le niveau 3 d'automatisation

Le niveau 3 d'automatisation conditionnelle est actuellement le plus haut niveau actuellement sur nos routes, avec par exemple le système DRIVE PILOT intégré aux véhicules

Mercedes. Ces systèmes automatisés de niveau 3 restent encore très limités, ces derniers étant autorisés uniquement sur des voies où les piétons ne sont pas autorisés (i.e., autoroute et rocade) et à une vitesse maximale de 60 km/h, correspondant à des situations de ralentissement ou d'embouteillages. Bien qu'ils soient actuellement autorisés dans des situations très restreintes, du fait de leur caractère de nouveauté, on peut facilement prédire l'élargissement de leur utilisation avec leur émergence sur nos routes.

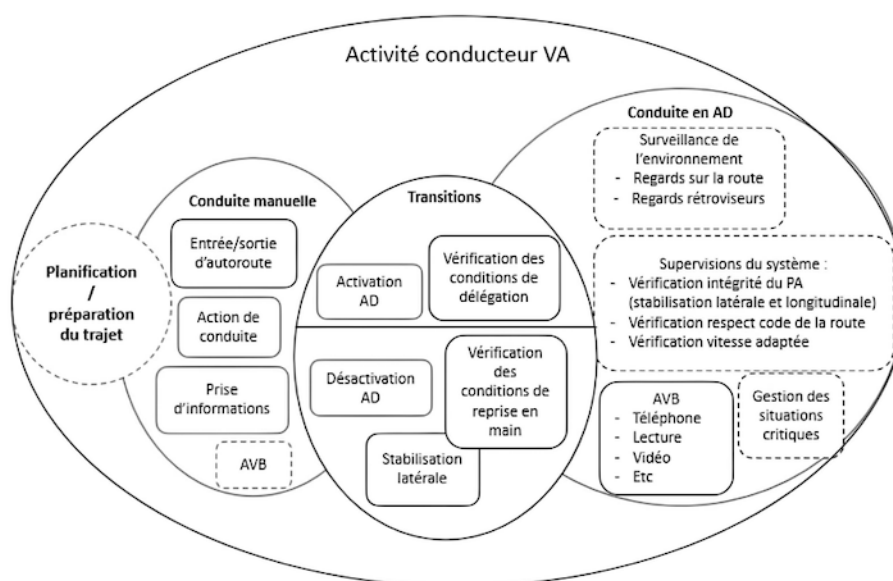
Dans cette thèse, nous nous focaliserons sur le niveau 3. En plus d'être le plus haut niveau actuellement sur nos routes, il représente le dernier niveau où l'humain aura encore l'obligation d'incarner le rôle de conducteur. Plus précisément, l'humain sera désormais conducteur-passager ou drivenger de son véhicule (i.e., contraction de driver et de passenger). En effet, lorsque le mode automatisé est activé, le drivenger peut s'engager au sein d'une tâche annexe, et donc se désengager totalement de la tâche de conduite. Lorsque les limites du système sont atteintes, il devra alors se désengager de la tâche annexe menée afin de se réengager dans la tâche de conduite. Cette nouvelle activité de conduite semi-automatisée de niveau 3 sous-tend une dynamique attentionnelle complexe, où l'individu va alterner différentes tâches durant son trajet d'un point A à un point B.

2.2.1. Modèle descriptif de l'activité de conduite automatisée de niveau 3

La littérature en psychologie cognitive et ergonomie ne s'est jusqu'à présent que très peu intéressée à la conception et la validation de modèles de l'activité de conduite automatisée. Le modèle de Poisson et al. (2015) tend à décomposer l'activité de conduite automatisée de niveau 3 en 4 sous-activités principales : la planification, la conduite manuelle, la transition et la conduite automatisée (voir Figure 2 ci-dessous). Le système automatisé est ici fonctionnel uniquement sur autoroute, ce qui est représentatif des véhicules automatisés de niveau 3 actuels.

L'activité de planification correspond, comme en conduite non-automatisée, à la préparation du trajet à venir. L'activité de conduite manuelle intègre les sous-tâches relatives aux actions de conduite (i.e., contrôle latéral et longitudinal par les actions menées sur le volant, les pédales et le levier de vitesse). Elle intègre également la prise d'informations dans l'environnement dynamique, ainsi que les potentielles « activités de vie à bord » que nous appellerons tâches annexes ou Non-Driving-Related-Tasks (i.e., NDRT, tâches non-relatives à la conduite). Par exemple, écouter de la musique, discuter avec le passager, regarder ses sms ou encore téléphoner sont des NDRT. Elles ne sont cependant pas toutes autorisées dans un contexte de conduite manuelle. Comme décrit dans le modèle de Poisson, l'engagement au sein de ces NDRT sont minoritaires en comparaison aux tâches principales relatives à la conduite. Au contraire, l'activité de conduite automatisée de niveau 3 consiste majoritairement à la réalisation de ces NDRT dans la mesure où la supervision de la conduite par le drivenger n'est plus requise.

Figure 2. Modèle de l'activité anticipée de conduite automatisée de niveau 3 (Poisson et al., 2015).



VA : véhicule autonome

AVB : activités de vie à bord

MD : manual driving : conduite manuelle

AD : autonomous driving : conduite automatisée

Les pointillés correspondent à des activités moins fréquentes.

2.3. Bénéfices attendus et risques émergents de l'automatisation de la conduite

Plusieurs bénéfices sont attendus de l'émergence et l'adoption de ce moyen de transport. Aujourd'hui, la première cause des accidents est attribuée à une « erreur humaine », causée par un déficit attentionnel du conducteur par rapport à la tâche de conduite (Dingus et al., 2006 ; Lemerancier & Cellier, 2008 ; Singh, 2015 ; Young & Regan, 2007). Ainsi, l'automatisation totale de la conduite prévoit de diminuer jusqu'à 90% les accidents de la route en supprimant l'humain de la boucle de la conduite (Bertoncello & Wee, 2015), et de ce fait en éliminant les défauts attentionnels causés par l'erreur humaine. D'autres bénéfices sont attendus de l'automatisation

totale des véhicules, avec par exemple des bénéfices écologiques. En effet, une meilleure fluidité des mouvements des véhicules (Anderson et al., 2016) ainsi qu'une diminution des embouteillages par l'optimisation de la circulation, par exemple en platooning (Litman, 2020), permettraient de réduire la consommation de carburant et ainsi diminuer les émissions de CO₂. Finalement, la « libération » de l'humain de la tâche de conduite pourra lui permettre de consacrer ce temps à d'autres activités, professionnelles ou de loisirs, ou simplement se relaxer lorsque le système automatisé est activé (Novak, 2007).

Bien que des bénéfices soient attendus de l'automatisation de la conduite, certains ne pourront être atteints que lors d'une automatisation totale (i.e., niveau 5) et généralisée des véhicules présents au sein du parc automobile. En effet, une diminution significative des accidents et de la mortalité routière ne pourra être atteinte que lorsque l'humain sera totalement retiré de la boucle de la conduite. Cependant, les véhicules dotés d'un système d'automatisation conditionnelle (i.e., niveau 3) ne sont capables de prendre entièrement en charge la conduite que dans certaines situations limitées, reléguant la conduite à l'humain lorsque le système n'est plus capable de prendre en charge la conduite de manière sécuritaire. Le drivenger est alors alerté de la désactivation prochaine du mode automatisé et doit se préparer à reprendre la conduite manuelle. Le fait de retirer l'humain que partiellement de la boucle de la conduite implique l'émergence de nouveaux risques de par la modification de l'activité de conduite. En effet, l'humain va alterner entre le statut de passager et celui de conducteur. Une des problématiques majeures provient de la transition entre ces deux statuts, durant la transition de contrôle, et en particulier lors de la transition entre le statut de passager à celui de conducteur.

Lors de ces phases de reprise de la conduite, le passager doit réacquérir son statut de conducteur. Ceci implique qu'il doit réacquérir rapidement une conscience de la situation optimale lui permettant de mettre en place des comportements sécuritaires et adaptés à la situation routière rencontrée lors de la reprise. Les recherches montrent cependant que les

risques présents lors de cette phase de reprise sont particulièrement élevés, les drivengers ayant des comportements inadaptés et des performances altérées lors de la reprise (Navarro, 2019). D'une part, le système automatisé est davantage enclin de se désactiver dans des situations trop complexes, critiques et donc exigeantes pour l'humain qui doit rapidement reprendre son statut de conducteur (Paxion et al., 2015). D'autre part, le temps nécessaire à la ré-acquisition d'une conscience de la situation optimale peut être insuffisant à la mise en place de comportements sécuritaires. Les recherches montrent par exemple que dans une situation de freinage d'urgence du véhicule suivi, plus la durée du TOR (TakeOver Request) est importante, plus la fréquence de collision avec le véhicule suivi est faible (i.e., 45% expérimentaient une collision lorsque le TOR était de 4.8 secondes, contre 15% lorsqu'il était de 6.6 secondes). Ainsi, de nouveaux risques émergent de la modification de l'activité de conduite par son automatisation partielle et non totale. C'est ce que Bainbridge appelait en 1983 l'ironie de l'automatisation. Dans le cas présenté ici, l'ironie de l'automatisation s'exprime par la volonté de réduire les risques en supprimant le facteur humain de la boucle de la conduite, mais en créant de nouveaux risques en ne le supprimant que partiellement.

Par ailleurs, de nouveaux risques peuvent émerger à long terme, au fur et à mesure de l'utilisation de ces véhicules d'autonomie partielle (i.e., niveau 2) ou conditionnelle (i.e., niveau 3). En effet, les conducteurs novices sont les plus vulnérables, ces derniers n'ayant pas automatisé le niveau opérationnel de la conduite, tel que le contrôle du véhicule (Michon, 1985; Paxion et al., 2015; Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977). L'expertise routière se développant avec la pratique, les drivengers pourraient ne jamais acquérir un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires lors des phases de conduite manuelle, et en particulier durant la phase critique qu'est la reprise (Hancock, 2014; Vlakveld, 2015). Ici encore, l'ironie de l'automatisation (Brainbridge, 1983) prend tout son

sens : en voulant réduire les risques en supprimant progressivement le facteur humain, on crée de nouveaux risques en appauvrissant les conducteurs de leurs habiletés et de leur expertise.

2.4. Les points clés sur la conduite automatisée

- L'automatisation de la conduite se fait de manière croissante. Le plus haut niveau actuellement sur nos routes est le niveau 3 d'automatisation conditionnelle, capable de prendre entièrement en charge la conduite sous certaines conditions, et sans supervision de l'humain.
- Bien que des bénéfices soient attendus de l'automatisation, tels que la réduction de la mortalité routière, de nouveaux risques émergent de cette technologie avec notamment une augmentation des risques présents lors de la reprise de la conduite et une diminution de l'expertise routière : c'est l'ironie de l'automatisation.
- Le modèle descriptif tel que celui de Poisson et al. (2015) permet de décomposer l'activité de conduite automatisée de niveau 3, nouvelle pour l'humain, afin de mieux comprendre la nature des interactions entre l'humain et les véhicules automatisés.

3. Les modèles explicatifs des performances de reprise dégradées

Reprendre la conduite après avoir expérimenté un trajet automatisé de niveau 3 s'avère être une tâche particulièrement critique où les risques accidentels sont accrus. En effet, la littérature montre que les comportements et performances de conduite des drivengers sont particulièrement dégradés lorsqu'ils reprennent le volant, en comparaison avec les comportements et performances des conducteurs en situation de conduite manuelle. De manière générale, les études rapportent un comportement visuo-attentionnel dégradé, des temps de

réaction plus longs face à une situation critique, des plus grands risques de collisions et une instabilité plus élevée du contrôle longitudinal et latéral du véhicule (Deniel & Navarro, 2023; Merat & Jamson, 2009; Navarro, 2019; Shen & Neyens, 2017; Strand et al., 2014).

La littérature s'accorde à attribuer les risques accidentels élevés présents lors de la reprise de la conduite à un défaut de l'attention des drivengers (cf. Navarro, 2019, pour une revue). Cependant, plusieurs explications sont apportées dans la littérature afin d'expliquer pourquoi l'attention des drivengers est altérée lorsqu'ils doivent reprendre le contrôle du véhicule après avoir expérimenté un trajet automatisé. Nous allons commencer par présenter l'effet « out-of-the-loop », relatif à la conscience de la situation des drivengers. Cette problématique sera ensuite exposée par rapport aux modèles des ressources attentionnelles et de la charge mentale. Finalement, nous expliciterons l'importance de l'orientation attentionnelle et de l'alternance entre tâche (i.e., task-switching) dans un contexte de reprise en main d'un véhicule automatisé de niveau 3.

3.1. Conscience de la situation et effet « out-of-the-loop »

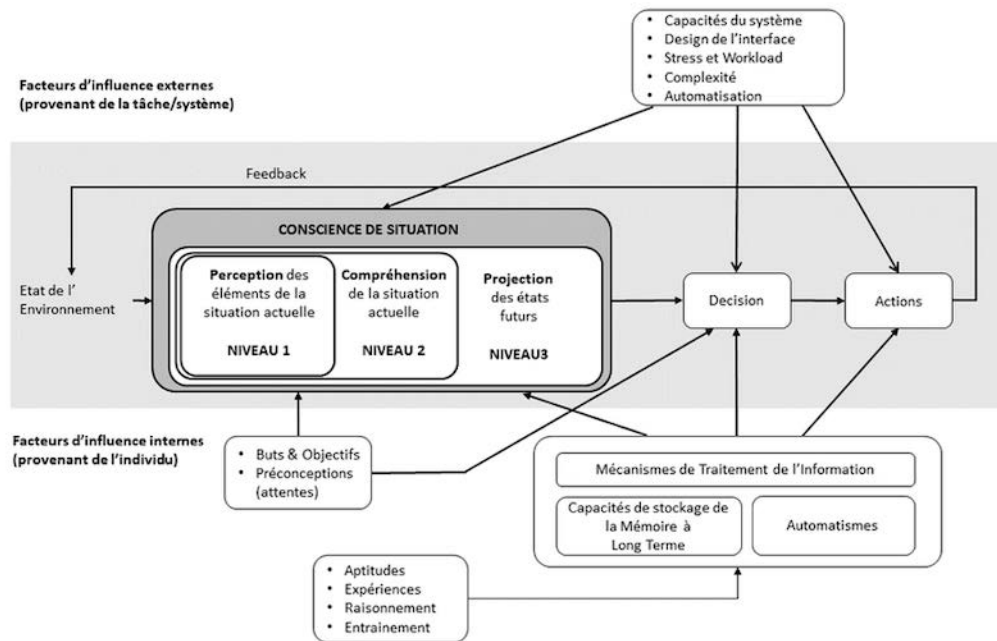
3.1.1. Le modèle des trois niveaux de conscience de la situation (Endsley, 1995)

Endsley (1995, p° 36) définit la conscience de la situation comme « *la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche* ». Dans un contexte de conduite automobile et de conduite automatisée, la conscience de la situation peut ainsi être définie comme la connaissance que se forme l'individu de la situation dynamique rencontrée. Le processus permettant de se former une conscience de la situation est décrit par Endsley (1995)

dans son modèle (voir Figure 3 ci-dessous). Ce processus est réalisé à travers 3 niveaux hiérarchiques :

- La **perception** des éléments présents au sein de la situation actuelle. L'individu va ainsi extraire les éléments pertinents de la situation rencontrée, en fonction de ses buts, de ses connaissances ainsi que de ses ressources attentionnelles disponibles (Bellet et al., 2009). Ici, l'attention sélective joue un rôle majeur dans la sélection des informations perçues qui vont ensuite être traitées. Ce niveau est majeur dans la mesure où une mauvaise sélection des éléments à traiter au sein de la situation routière va impacter négativement les autres niveaux, c'est-à-dire la compréhension de la situation et la projection de ces éléments dans un état futur.
- La **compréhension** de la situation routière actuelle. L'individu va se construire une représentation globale de la situation en fonction des éléments sélectionnés, perçus et traités. Ce niveau correspond ainsi à l'interprétation de la situation routière rencontrée, ce qui est déterminant dans la mise en place de comportements sécuritaires.
- La **projection** des éléments de la situation routière dans un état futur. L'individu va ici anticiper les potentiels futurs états de la représentation qu'il se fait de la situation routière (i.e., niveau 2). La projection à court terme des éléments de la situation routière va directement impacter la prise de décision de l'individu et la mise en place des comportements de conduite qu'il va entreprendre.

Figure 3. Modèle des trois niveaux de conscience de la situation de Endsley (1995).

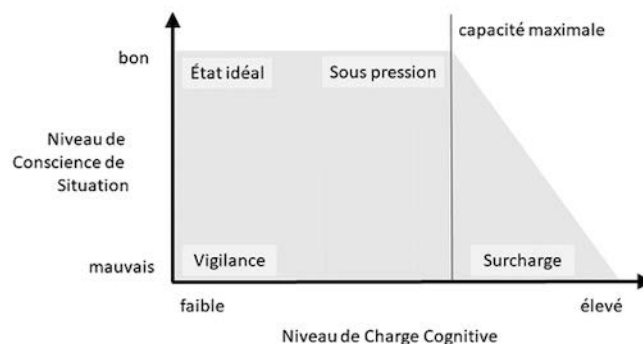


La conscience de la situation est un concept clé dans l'étude du facteur humain et des interactions homme-machine. En conduite automobile automatisée et non-automatisée, la conscience de la situation du conducteur est déterminante des performances de conduite et de reprise de la conduite et de la mise en place de comportements sécuritaires (Parasuraman et al., 2008). Notons que ces trois niveaux hiérarchiques décrits dans le modèle de Endsley (1995) ne sont pas à considérer comme des étapes successives mais davantage comme une boucle active (Bellet et al., 2009; Neisser, 1978) où les niveaux sont interdépendants (Ward, 2000). En effet, la compréhension et la projection des éléments de la situation vont contribuer à guider l'exploration de l'environnement et donc les informations perçues. Ces informations perçues vont ainsi permettre de mettre à jour la représentation mentale de la situation routière (i.e., niveau 2 de compréhension) et leur projection dans un état futur (i.e., niveau 3). Ainsi, les trois niveaux de conscience de la situation doivent être suffisants à la mise en place de comportements sécuritaires.

3.1.2. *Relation entre la conscience de la situation et la charge mentale*

La conscience de la situation est également un concept directement lié à la charge mentale ou charge cognitive (Tsang et Vidulich, 2006). Celle-ci est définie comme le rapport entre la demande de la tâche et les ressources humaines disponibles (Cain, 2007). La charge mentale peut être caractérisée comme la quantité de ressources attentionnelles mobilisées afin de répondre aux exigences de la tâche à réaliser, dans la limite des capacités ou quantité de ressources de l'individu. Ainsi, lorsque la demande de la tâche dépasse la quantité de ressources attentionnelles disponibles, les capacités maximales de l'individu sont atteintes. Il sera alors en surcharge mentale, c'est-à-dire qu'il ne disposera plus de ressources attentionnelles disponibles pour répondre aux exigences trop élevées de la tâche prescrite. Ainsi, un état de surcharge va engendrer un manque de ressources attentionnelles disponibles, ce qui peut dégrader la conscience de la situation de l'individu (i.e., perception, compréhension et projection) et les performances de conduite ou de sa reprise (voir Figure 4 ci-dessous).

Figure 4. Relation entre le niveau de conscience de la situation et le niveau de charge cognitive (Endsley, 1996).



Ainsi, une charge mentale trop importante va détériorer la conscience de la situation et les performances de reprise. Cependant, les recherches montrent que les drivengers en conduite automatisée expérimentent un état de sous-charge mentale durant le mode automatisé (De Winter et al., 2014) et une conscience de la situation insuffisante lors de la reprise (Merat et al., 2014). Il est donc peu probable que performances de reprise dégradées soient expliquées par une réelle surcharge mentale, c'est-à-dire lorsque les limites fixes et naturelles des réservoirs de ressources attentionnelles sont atteintes.

3.1.3. Relation entre la conscience de la situation et l'effet out-of-the-loop

En conduite automatisée de niveau 3, l'effet « out-of-the-loop » ou « en dehors de la boucle » correspond au fait de retirer l'humain de la boucle de la conduite lorsque le système automatisé est activé. Selon Kienle et al. (2009), le drivenger sorti de la boucle de la conduite *« n'a pas à tout moment conscience du véhicule et de la situation de conduite car il ne surveille pas, ni ne prend de décisions quant à la tâche de conduite. De plus, il n'alimente plus les boucles de contrôles de la tâche de conduite »*. Ainsi, le fait de retirer le drivenger de la boucle de la conduite va détériorer sa conscience de la situation, même si ce dernier continue à superviser l'environnement routier durant le mode automatisé (i.e., niveau 2 où la supervision est requise, ou niveau 3 où elle n'est plus requise mais peut être initiée par le drivenger). En effet, l'humain est un mauvais superviseur, c'est-à-dire qu'il a des difficultés à maintenir un état de vigilance constant, en particulier lors d'une tâche monotone ne nécessitant aucune action (Campagne et al., 2004; Parasuraman & Riley, 1997). En cas d'inopérabilité du système automatisé, le drivenger expérimenterait alors des difficultés à revenir dans la boucle de la conduite et à réacquérir une conscience de la situation optimale, impliquant des performances détériorées et des risques accidentels élevés (Kaber & Endsley, 2004; Merat et al., 2014).

Les définitions restent cependant peu précises sur la cause de la sortie de boucle : est-ce que le conducteur est en dehors de la boucle lorsqu'il ne contrôle plus le véhicule (i.e., composante physique), lorsqu'il ne surveille plus suffisamment l'environnement (i.e., composante cognitive) ou les deux ? Afin de répondre à cette question, (Merat et al., 2019) Merat et al. (2019) se sont efforcés de définir plus en détails ce concept en différenciant trois niveaux du conducteur (i.e., ou pour nous, du drivenger), en fonction de son niveau de contrôle (i.e., cognitif ou physique). Celui-ci peut être dans la boucle, sur la boucle ou en dehors de la boucle de la conduite (voir Table 2 ci-dessous).

Table 2. Les trois niveaux du conducteur dans la boucle de la conduite (Merat et al., 2019)

	Dans la boucle (in-the-loop)	Sur la boucle (on-the-loop)	En dehors de la boucle (out-of-the-loop)	
Contrôle physique du véhicule	oui	non	non	oui
Supervision de l'environnement routier	oui	oui	non	non

En conduite non-automatisée (niveau 0 ; SAE, 2016) ou d'aide à la conduite (niveau 1), un conducteur sera **en dehors de la boucle** s'il ne supervise plus complètement l'environnement routier, par exemple en cas de distraction par une tâche annexe. Aux niveaux 2 et 3 d'autonomie partielle et conditionnelle, il sera **sur la boucle** s'il contrôle suffisamment

l'environnement. Ceci implique qu'il n'est plus tout à fait dans la boucle de la conduite, mais aura une conscience de la situation suffisamment représentative de la situation routière réelle afin de reprendre de manière sécuritaire le contrôle du véhicule en cas d'inopérabilité du système. Au contraire, si sa supervision est insuffisante (i.e., ce qui peut l'être même lorsqu'elle est obligatoire en niveau 2), il sera en dehors de la boucle. Cela signifie qu'en cas d'inopérabilité du système, le drivenger aura des difficultés à réacquérir rapidement une conscience de la situation suffisante à la mise en place de comportements sécuritaires.

La conscience de la situation apparaît comme un concept central dans la compréhension des performances détériorées et des risques accidentels associés, en conduite automatisée ou non-automatisée. Le simple fait de retirer l'humain de la boucle de la conduite, et donc son manque de supervision de l'environnement en conduite automatisée, serait responsable de sa mauvaise conscience de la situation et des performances détériorées observées lors de la reprise. Cependant, cette explication apparaît incomplète dans la mesure où les performances de reprise diffèrent en fonction des caractéristiques individuelles, situationnelles et relatifs à la tâche annexe menée durant le mode automatisé, comme nous le verrons dans la partie 4 du cadre théorique, ci-dessous. La présence ainsi que la nature de la NDRT (Non-Driving-Related-Task) ou tâche annexe menée durant le mode automatisé peuvent modifier les performances de reprise des drivengers. Par exemple, les drivengers s'engageant dans une NDRT de jeu exigeante avaient de meilleures performances de reprise (i.e., contrôle du véhicule) que ceux ne réalisant pas de tâche annexe (Pampel et al., 2019). De plus, les drivengers ne réalisant pas de NDRT supervisaient davantage l'environnement routier que ceux réalisant une NDRT. Ainsi, l'hypothèse d'une dégradation de la conscience de la situation et des performances résultant uniquement d'un manque de supervision de l'environnement durant le mode automatisé, apparaît peu probable, ou du moins incomplète.

Comme explicité précédemment, la qualité de la conscience de la situation que va se former l'individu dépend de la quantité de ressources attentionnelles dont il dispose, et donc de sa charge mentale lorsqu'il doit revenir dans la boucle de la conduite. Les modèles des ressources attentionnelles peuvent ici avoir un apport complémentaire à l'effet « out-of-the-loop » permettant d'expliquer la conscience de la situation détériorée et les performances dégradées observées lors de la reprise en main d'un véhicule automatisé de niveau 3.

3.2. Les modèles des ressources attentionnelles

3.2.1. L'attention en tant que réservoir de ressources fixes

Dans les modèles classiques de l'attention, tels que celui développé par Wickens (2008), plusieurs réservoirs distincts de ressources attentionnelles sont considérés (voir Figure 5 ci-dessous). Ces réservoirs se distinguent en fonction de la nature sensorielle de l'information perçue (visuelle, auditive), de la modalité de traitement de l'information (spatiale, verbale) ainsi que de la modalité de réponse (motrice, vocale). Ce modèle prédit une dégradation des performances en cas de saturation d'un des réservoirs de ressources. Ce modèle s'avère être particulièrement pertinent dans une situation de multitâche. Le modèle prévoit ainsi que la réalisation de plusieurs tâches en temps partagé et impliquant les mêmes réservoirs de ressources va détériorer davantage les performances à l'ensemble des tâches, que la réalisation de plusieurs tâches impliquant des réservoirs différents. Pour Wickens, une détérioration des performances est donc uniquement attendue en cas de surcharge, c'est-à-dire lorsque l'un des réservoirs fixes de ressources attentionnelles a atteint sa limite naturelle (Voir Figure 6 ci-dessous).

Figure 5. Modèle des ressources multiples (Wickens, 2008)

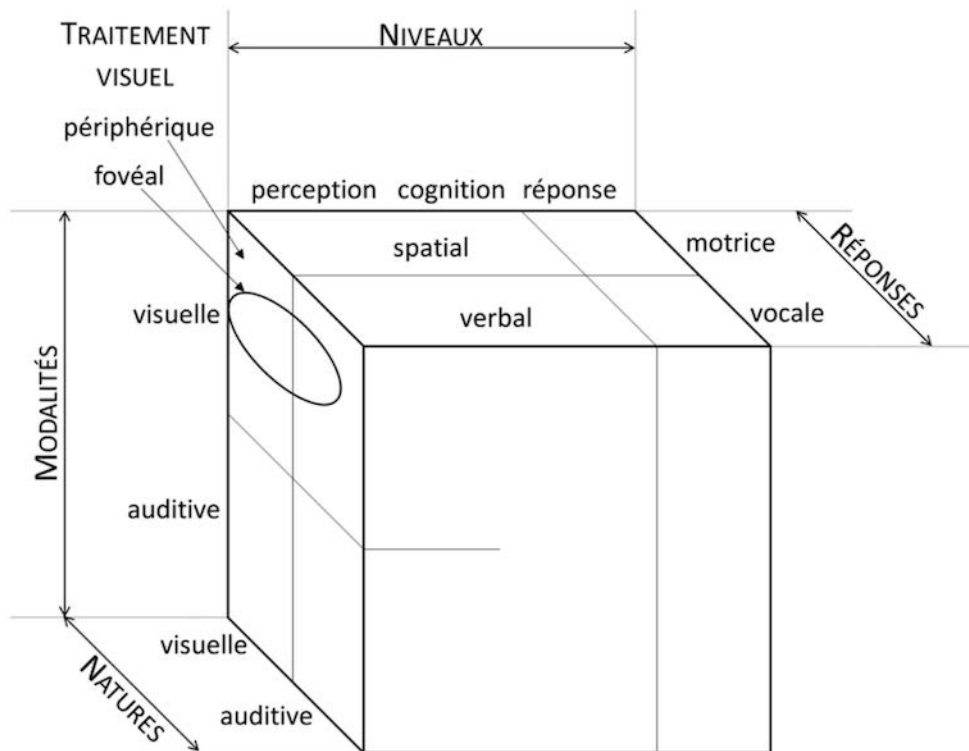
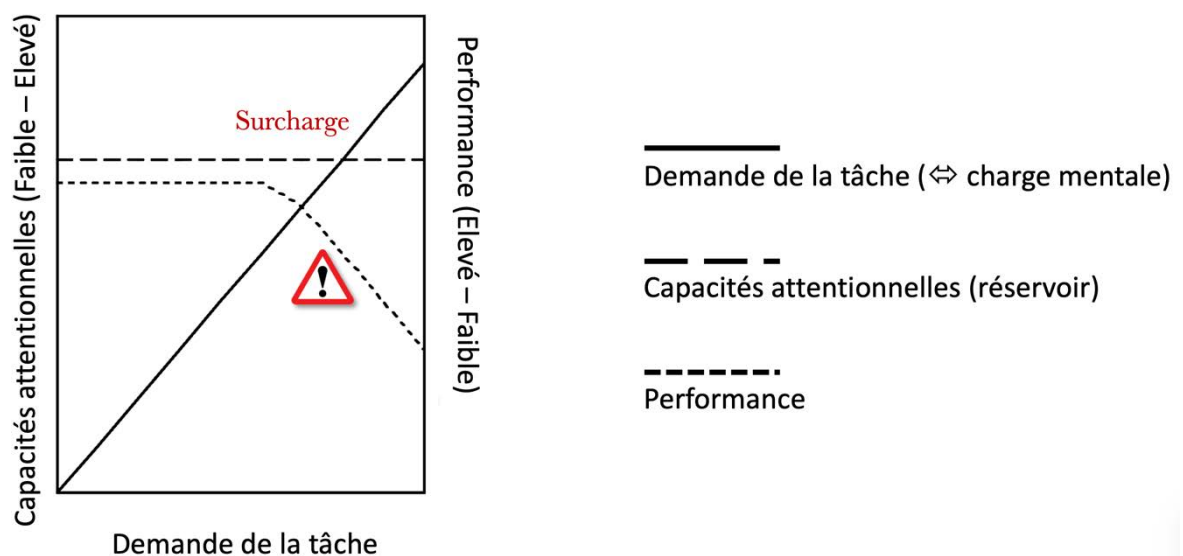


Figure 6. Hypothèses de dégradation des performances selon les modèles classiques des ressources attentionnelles fixes.



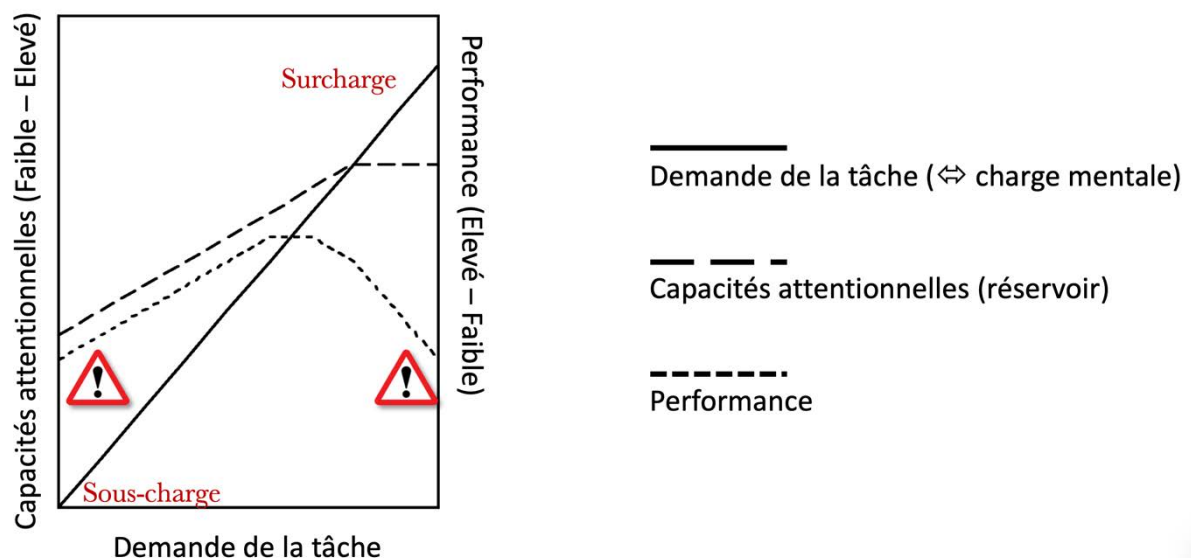
Dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3, la conscience de la situation et les performances détériorées observées lors de la reprise seraient ici expliquées par la surcharge d'un ou plusieurs réservoirs de ressources attentionnelles. En effet, la reprise de la conduite est une tâche pouvant être exigeante en ressources attentionnelles, comme nous allons le voir (cf. partie 3.2.2. ci-dessous). Cependant, les recherches, et notamment la méta-analyse menée par De Winter et al. (2014), mettent en évidence que les drivengers expérimenteraient un état de sous-charge mentale durant le mode automatisé. Or, la littérature montre que les performances peuvent être dégradées en cas de surcharge d'un ou plusieurs réservoirs de ressources attentionnelles, mais également en cas de sous-charge mentale, c'est-à-dire lorsque l'individu n'investit que très peu de ressources attentionnelles en réponse aux faibles exigences de la tâche menée (Desmond & Hoyes, 1996; Young and Stanton, 2002a, b, 2007, 2020). Ainsi, les performances de reprise dégradées observées lors de la reprise pourraient être expliquées par l'état de sous-charge expérimenté par les drivengers durant le mode automatisé. Contrairement aux modèles fixes prévoyant une détérioration des performances uniquement en cas de surcharge, le modèle MART des ressources attentionnelles malléables (Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020) prédit une dégradation des performances en cas de surcharge et de sous-charge des réservoirs de ressources attentionnelles.

3.2.2. L'attention en tant que réservoir de ressources malléables

Le modèle développé par Young et Stanton (2002a, b, 2007, 2020) considère les capacités attentionnelles comme malléable, contrairement au modèle de Wickens décrit précédemment. Selon ces auteurs, une dégradation est à prévoir en cas de surcharge du ou des réservoirs de ressources, mais aussi en cas de sous-charge (voir Figure 7 ci-dessous). Ainsi, les réservoirs de ressources attentionnelles sont considérés comme malléables, c'est-à-dire qu'ils vont s'adapter

à la demande de la tâche en cours de réalisation. Ainsi, les réservoirs de ressources seront plus importants lorsque l'individu réalise une tâche exigeante que lorsqu'il réalise une tâche faiblement exigeante. Une détérioration des performances est alors prévue lorsque les ressources attentionnelles requises par la tâche dépassent les ressources disponibles.

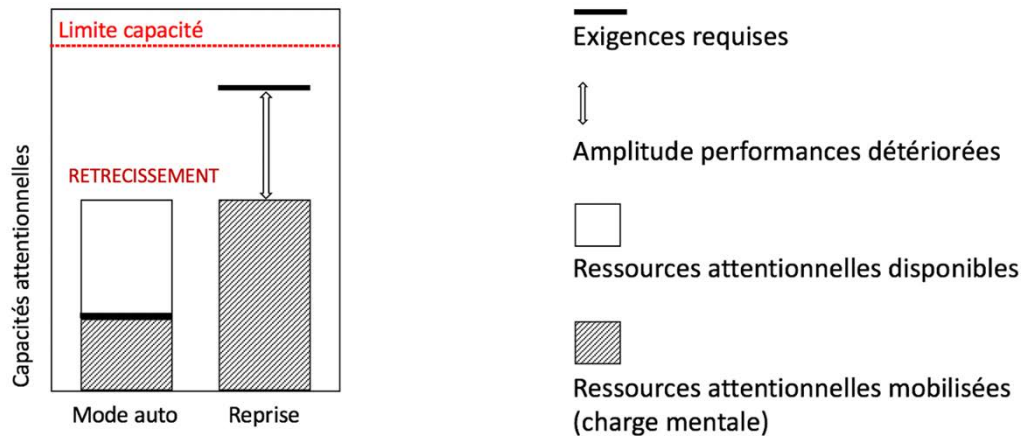
Figure 7. Hypothèses de dégradation des performances selon le modèle MART des ressources attentionnelles malléables.



Comme expliqué par les auteurs, ce modèle apparaît particulièrement pertinent dans l'explication des performances détériorées observées chez les Conducteurs-Passagers (CP) lors de la reprise de la conduite. D'une part, la reprise est connue pour être une tâche exigeante en raison de divers facteurs. Tout d'abord, la défaillance du système qui précède la prise en charge oblige les conducteurs à évaluer correctement l'état du système, ce qui exige des ressources attentionnelles. En outre, la pression temporelle imposée par les prises de contrôle peut augmenter la charge de travail mental des conducteurs, ce qui accroît le stress et les exigences

de la tâche (Bucks & Seljos, 1994 ; Galy, Cariou, & Mélan, 2012 ; Inzana et al., 1996 ; Matthews & Desmond, 1995 ; Monod & Kapitaniak, 1999). Le système est également plus susceptible de se désactiver dans des situations complexes et potentiellement dangereuses, connues pour être très exigeantes (Merat et al., 2012 ; Paxion, Galy, & Berthelon, 2015). Enfin, le changement attentionnel requis lorsque les conducteurs s'engagent dans une NDRT pendant la conduite automatisée, ou la poursuite en temps partagé (c'est-à-dire la double tâche) lorsqu'ils doivent reprendre la conduite, peuvent encore accroître la demande relative à la reprise de la conduite (Merat et al., 2012; Monsell, 2003; Recarte & Nunes, 2003). D'autre part, la faible sollicitation des conducteurs pendant la conduite automatisée se traduit par un faible MWL (De Winter et al., 2014). Selon MART, cet état de sous-charge des conducteurs se traduit par une réduction ou un rétrécissement des ressources attentionnelles en tant que mécanisme adaptatif des capacités attentionnelles ou réservoirs de ressources pour répondre à la demande de la tâche. Par conséquent, lorsque l'alerte à la reprise de la conduite manuelle ou TOR (TakeOver Request) survient, les conducteurs peuvent ne pas disposer de ressources attentionnelles suffisantes pour faire face à l'augmentation soudaine de la demande des tâches, ce qui nécessite un temps d'adaptation pour retrouver une capacité attentionnelle optimale (voir Figure 8 ci-dessous).

Figure 8. Dynamique des ressources attentionnelles selon le modèle MART (Young & Stanton, 2002a, b, 2007, 2020).



Le modèle MART des ressources attentionnelles malléables apparaît majeur dans la compréhension des performances détériorées observées lors de la reprise. Cependant, très peu d'études n'ont jusqu'à présent évalué le modèle MART dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3, bien que les résultats obtenus dans certaines études soient en faveur de ce modèle (Pampel et al., 2019; Shi & Bengler, 2022; Yoon & Ji, 2019). Un des objectifs de cette présente thèse est ainsi d'apporter de nouveaux éléments empiriques au modèle MART, en évaluant l'impact de la demande de la tâche menée durant le mode automatisé sur les capacités attentionnelles, la charge mentale et les performances de reprise des drivengers, en contexte de conduite automatisée de niveau 3.

Il est en effet très probable que les drivengers s'engagent au sein d'une NDRT durant le mode automatisé dans la mesure où sa supervision de l'environnement n'est plus requise au niveau 3. Ainsi, la reprise de la conduite est une tâche où le drivenger devra réorienter son attention de la NDRT vers la reprise de la tâche de conduite. Cette réorientation ou switch

attentionnel et cognitif s'avère être un processus coûteux en termes de ressources attentionnelles, pouvant dégrader les performances à l'ensemble des tâches menées (Monsell, 2003). Il apparaît ainsi nécessaire de s'intéresser aux modèles du task-switching afin de mieux comprendre l'activité de conduite automatisée de niveau 3, et ainsi de mieux évaluer et prévenir les risques émergents de cette activité nouvelle pour l'humain.

3.3. Orientation de l'attention et task switching

3.3.1. Le modèle du contrôle attentionnel de Posner (1980, 1988)

Le modèle du contrôle attentionnel de Posner (1980, 1988) décrit le système attentionnel visuo-spatial en trois sous-systèmes :

- **La détection** ou système d'alerte correspond à la détection consciente d'un stimulus, par exemple dans des situations de vigilance où l'attention est soutenue, telles que la supervision de l'environnement routier en conduite automatisée.
- **L'orientation** correspond à la direction de l'attention vers un stimulus interne (e.g., état de fatigue) ou externe à l'individu (e.g., freinage du véhicule suivi). L'orientation endogène et exogène de l'attention sont distinguées. **L'orientation endogène** correspond à une orientation volontaire de l'attention, contrôlée par les attentes de l'individu (i.e., traitements cognitifs « top-down » ou descendants ». En conduite, on parle d'orientation endogène lorsqu'on oriente notre attention vers nos pensées (i.e., orientation interne endogène). Par ailleurs, lorsqu'on conduit et qu'on va par exemple orienter notre attention vers une intersection connue comme étant à risque, on va orienter intentionnellement notre attention, car on s'attend à la présence d'autres véhicules. On parle alors d'orientation externe endogène de l'attention. **L'orientation exogène** correspond à l'attrait automatique de

l'attention par l'apparition soudaine d'un stimulus saillant au sein de l'environnement. En conduite, l'apparition soudaine et inattendue d'un piéton sur la voie, correspond à une orientation exogène de l'attention.

- **Le contrôle exécutif** indique la manière dont nous devons traiter les informations, prendre des décisions, par exemple dans une situation de résolution de conflit. C'est le contrôle exécutif qui permet de sélectionner et d'exécuter le traitement d'une tâche donnée. Par exemple, dans le cas de la traversée soudaine d'un piéton sur la route, le système d'alerte va permettre de détecter la cible, le système d'orientation va déplacer l'orientation du conducteur vers cette cible, et finalement, le contrôle exécutif permettra au conducteur de prendre la décision de freiner ou dévier sa trajectoire afin d'éviter une collision.

Le système d'orientation de l'attention décrit dans le modèle de Posner (1980, 1988) nous intéresse ici particulièrement. D'une part, l'orientation est un système majeur dans l'activité de conduite, le conducteur orientant constamment son attention vers des éléments visuo-spatiaux de l'environnement routier, que ce soit de manière automatique (i.e., orientation exogène) ou contrôlée (i.e., orientation exogène). Dans un contexte de conduite automatisée, ce système d'orientation est particulièrement mis en œuvre durant la période de transition de contrôle, le drivenger devant réorienter son attention de la tâche annexe ou NDRT menée durant le mode automatisé vers l'environnement routier afin de reprendre la tâche de conduite. Comme nous allons le voir dans la partie 3.3.2. ci-dessous, cette période de reprise sous-tend également des mécanismes d'alternance entre tâches ou task-switching, connus pour être coûteux en ressources et pouvant contribuer aux performances détériorées observées lors de la reprise.

3.3.2. *L'alternance entre tâche ou task-switching*

Jusqu'au niveau 2 d'automatisation, l'engagement du conducteur au sein d'une NDRT se fait en parallèle de la tâche de conduite. La concurrence entre la tâche de conduite et la NDRT s'inscrit dans le paradigme de la double-tâche. A partir du niveau 3 d'automatisation, la supervision de l'environnement par le conducteur n'est plus requise. Le conducteur, désormais drivenger, peut ainsi s'engager au sein d'une NDRT sans superviser la tâche de conduite. Ainsi, la NDRT devient la tâche principale. Le drivenger doit cependant reprendre la tâche de conduite lorsque le système n'est plus capable de prendre en charge la conduite de manière sécuritaire. Ainsi, cette transition de contrôle entre les modes automatisés et manuel de conduite s'inscrit dans un paradigme d'alternance entre tâches, aussi appelé task-switching (Shi & Bengler, 2022; Weaver & DeLucia, 2022; Zeeb et al., 2017). Lors de la survenue de l'alerte à la reprise, le drivenger doit se désengager de la NDRT menée durant le mode automatisé pour ainsi réorienter son attention vers l'environnement routier et se réengager au sein de la tâche de conduite. Ceci implique un switch attentionnel de la NDRT vers la tâche de conduite qui redevient la tâche principale du drivenger.

Depuis les recherches menées par Alport et al. (1994) ainsi que par Rogers & Monsell, (1995), nous savons que switcher entre différentes tâches est un processus coûteux en termes de ressources, pouvant engendrer des performances dégradées à l'ensemble des tâches menées en alternance. Le paradigme du task-switching se déroule de la manière suivante : les individus réalisent une tâche sur plusieurs items. Sur certains items, la tâche change (i.e., items de switch). Sur d'autres, la tâche reste la même (i.e., items de répétition). Le coût du switch est évalué par la différence entre la performance obtenue aux items de switch et celle obtenue aux items de répétition. Selon Kiesel et al. (2010, p. 849), « la performance lors des switches de tâches est comparée à celle des répétitions. Le phénomène de base est qu'il existe un « coût du switch » très robuste, à la fois dans le temps de réaction et dans le taux d'erreur ».

Le coût associé au switch et la détérioration des performances qui en résultent peuvent être expliquées par **la reconfiguration des paramètres de la nouvelle tâche** (Monsell, 2003; Monsell et al., 2000; Rogers & Monsell, 1995) ainsi que par **l'inertie des paramètres de la tâche** (Allport et al., 1994; L. H. Evans et al., 2015)(Allport et al., 1994 ; Evans et al., 2015). D'une part, la reconfiguration des paramètres de la nouvelle tâche correspond au « coût nécessaire aux processus contrôlés pour reconfigurer le système cognitif à la nouvelle tâche » (Evans et al., 2015). D'autre part, l'inertie des paramètres de la tâche correspond à la persistance de l'activation de la première tâche, qui va interférer avec la nouvelle tâche et altérer les performances à celle-ci. Bien que la littérature supporte majoritairement l'hypothèse de l'inertie des paramètres de la tâche (Kiesel et al., 2010), les deux hypothèses peuvent être complémentaires comme le montre Rubinstein et al. (2001)

Dans son modèle, Rubinstein décrit **deux processus** : le processus relatif à la **tâche** et le processus relatif au **contrôle exécutif**. Le processus relatif à la tâche correspond, pour chaque tâche menée, à l'**identification du stimulus**, à la **sélection de la réponse** et finalement à la **réponse motrice**. Le coût du switch résulte ici de la mise en place des processus relatifs au contrôle exécutif, ce qui surviendrait entre l'identification du stimulus et la sélection de la réponse. **Deux processus relatifs au contrôle exécutif** sont décrits dans ce modèle :

- Le processus relatif au **changement d'objectif** permet le suivi des tâches actuelles et futures et la modification des buts de l'individu en fonction de la tâche à réaliser.
- Le processus relatif à l'**activation des règles ou paramètres de la tâche** survient entre la modification des buts de l'individu et la sélection de la réponse à la nouvelle tâche. Ce processus correspond à la désactivation des paramètres de l'ancienne tâche, ou tâche initiale, et à l'activation des paramètres de la nouvelle tâche.

Ainsi, le coût du switch serait les résultats de la reconfiguration nécessaire des paramètres de la nouvelle tâche, ainsi que de la persistance de l'activation de l'ancienne tâche, lors du switch vers la nouvelle tâche. Dans un contexte de conduite automatisée, le switch nécessaire entre la NDRT et la reprise de la conduite est un processus coûteux en termes de ressources attentionnelles. Le coût du switch peut ainsi avoir des répercussions sur la conscience de la situation et les performances des drivengers lors de la reprise. Il apparaît crucial d'appréhender le comportement des drivengers lors de la reprise, au regard de la perte de la conscience de la situation résultant de la sortie de la boucle de la conduite, des effets négatifs associés à la sous-charge mentale sur les capacités attentionnelles ainsi qu'au regard du coût relatif au switch initié par la désactivation du système automatisé. Il s'avère également nécessaire de considérer l'ensemble de ces modèles, afin de tendre vers une théorie unifiée permettant de prédire le comportement des drivengers. Ceci permettrait également de mieux appréhender les facteurs internes ou externes à l'individu pouvant impacter ses performances de reprise, dans une perspective de prévention des risques émergents des véhicules automatisés, ce qui est l'un des objectifs de cette thèse.

3.4. Les points clés sur les modèles explicatifs des performances de reprise dégradées

- Plusieurs explications sont apportées dans la littérature concernant la conscience de la situation altérée et les performances de reprise dégradées des drivengers en conduite automatisée de niveau 3.
- L'effet « out-of-the-loop » explique les performances détériorées par la perte de la conscience de la situation associée au retrait du drivengers de la boucle de la conduite durant le mode automatisé.

- Les théories des ressources attentionnelles fixes expliquent les performances détériorées par la surcharge d'un ou des réservoirs de ressources.

- Au contraire, la théorie des ressources attentionnelles malléables (Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020) associe la sous-charge mentale rapportée lors du mode automatisée (De Winter et al., 2014) à un rétrécissement des capacités attentionnelles temporaire, ne permettant pas aux drivengers de répondre à l'augmentation soudaine de la demande de la tâche de reprise.

- Finalement, les modèles relatifs au task-switching associent la dégradation des performances au coût du switch.

- Un modèle unifié du comportement des drivengers en conduite automatisée doit tendre vers une intégration des modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles multiples et malléables et du switch attentionnel afin de comprendre les processus psychologiques intervenant dans cette activité nouvelle pour l'humain, et ce dans sa globalité.

4. Facteurs impactant les comportements des conducteurs et des drivengers

4.1. L'engagement au sein d'une tâche annexe

Dans la littérature, on observe beaucoup d'études qui se sont intéressées à l'impact causé par l'ajout d'une tâche annexe sur la charge mentale, la mobilisation des ressources attentionnelles et les performances des conducteurs en condition de conduite manuelle. Lorsqu'ils sont en situation de conduite et qu'ils doivent réaliser en parallèle une tâche secondaire (i.e., paradigme de la double-tâche), les études montrent que les conducteurs doivent mobiliser davantage de ressources attentionnelles, engendrant un accroissement de leur charge mentale et une détérioration de leur balayage visuel de la scène routière (e.g., Recarte & Nunes, 2003). Plus la tâche de conduite et/ou la tâche annexe secondaire sont exigeantes en ressources, plus la charge

mentale et la quantité de ressources attentionnelles mobilisées augmentent, pouvant mener à une diminution des performances en cas de surcharge. Chez les conducteurs, l'ajout d'une tâche secondaire en double tâche s'avère être particulièrement critique, dans la mesure où leurs ressources attentionnelles disponibles sont plus limitées que chez les conducteurs experts (Logan, 1988; Michon, 1985; Spelke et al., 1976).

La particularité du niveau 3 d'autonomisation est la possibilité pour les drivengers de s'engager dans une multitude de tâches annexes lorsque le système est activé. Selon le modèle MART (Young & Stanton, 2002a, b, 2007, 2020), la réalisation d'une tâche annexe suffisamment exigeante durant le mode automatisé permettrait de maintenir les capacités attentionnelles à un niveau optimal et ainsi à préserver les performances de reprise. Cependant, l'impact de l'engagement au sein d'une tâche annexe sur les performances de reprise n'est pas clair, les résultats rapportés dans la littérature étant contradictoires. En ce qui concerne les études montrant un effet négatif, par exemple, Merat et al. (2012) ont démontré que l'implication dans une NDRT (une tâche audio-vocale de 20 questions) augmentait le temps de réactions face aux situations critiques rencontrées lors de la reprise. Cette conclusion a également été confirmée par Wandtner et al. (2018a) qui ont constaté que les risques associés à la reprise étaient plus élevés pour les drivengers réalisant à une tâche annexe visuo-motrice que pour ceux ne réalisant pas de tâche annexe. A contrario, certaines études soutiennent le modèle en montrant un effet positif de l'engagement, au sein d'une NDRT sur les performances. Par exemple, Yoon & Ji (2019), ainsi que Lee et al. (2021) ont constaté une corrélation négative entre la charge mentale et le temps de reprise (c'est-à-dire le temps écoulé entre le moment où l'on est alerté et celui où l'on interagit pour la première fois avec le véhicule), ainsi qu'entre la charge mentale et le contrôle du véhicule. En d'autres termes, une augmentation de la charge mentale, induite par la tâche annexe, a permis de réduire le temps de prise en charge et d'améliorer le contrôle latéral et longitudinal du véhicule. Pampel et al. (2019) ont démontré

que les conducteurs sont plus performants en termes de maintien de leur position latérale, après la reprise, lorsqu'ils s'engageaient dans une tâche annexe de jeu, durant le mode automatisé que lorsqu'ils ne réalisaient pas de tâche annexe.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer les résultats contradictoires observés dans la littérature. Tout d'abord, la demande de la tâche annexe réalisée durant le mode automatisé n'est pas systématiquement contrôlée et peut avoir un impact sur les performances de la reprise (par exemple, Lee, Yoon et Ji, 2021 ; Yoon et Ji, 2019). La poursuite de la tâche annexe durant l'alerte à la reprise et la reprise effective de la conduite, peuvent expliquer les résultats en faveur d'un effet négatif de la tâche annexe sur les performances. La réalisation d'une tâche annexe, parallèlement à la reprise, peut conduire les conducteurs à une situation de double tâche (Recarte & Nunes, 2003) ou d'alternance entre tâches (Monsell, 2003), ce qui contribue à augmenter la charge mentale, à diminuer l'attention allouée à la tâche de reprise et à altérer la conscience de la situation et les performances.

Les recherches varient également en fonction du type et de l'exigence des situations routières rencontrées lors de la reprise. Les situations routières complexes (i.e., trafic dense, mauvaises conditions météorologiques, route urbaine, suivi de véhicule à vitesse irrégulière) peuvent accroître la charge mentale ou l'écart entre les capacités attentionnelles et la demande de la tâche, engendrant une détérioration des performances de reprise (Gold et al., 2016; Paxion et al., 2015; Radlmayr et al., 2014; Ünal et al., 2012). Selon la théorie des ressources multiples (Wickens, 2008), les modalités de la tâche annexe peuvent avoir un impact sur les performances de reprise. Comme montré par Wandtner et al. (2018b) et Roche et al. (2019) dans un contexte de conduite automatisée, l'engagement dans une tâche annexe qui implique les mêmes réservoirs de ressources attentionnelles que la conduite (par exemple, visuo-motrice) va interférer davantage avec la tâche de conduite, par rapport à une tâche annexe impliquant des réservoirs différents (par exemple, audio-vocale).

Selon le modèle MART, s'engager dans une tâche annexe suffisamment exigeante qui partage les mêmes réservoirs de ressources que la tâche de conduite, permettrait de maintenir des capacités attentionnelles optimales et de préserver la performance de prise en charge. Par conséquent, les caractéristiques de la tâche annexe (i.e., demande de la tâche, modalités ou type de ressources impliquées, moment d'interruption) et celles de la situation routière rencontrée lors de la reprise (i.e., complexité, criticité) peuvent impacter les performances de reprise en influençant soit la disponibilité des capacités attentionnelles individuelles (par exemple, sous-charge ou surcharge), soit la demande requise par la tâche de reprise de la conduite. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse visent ainsi à déterminer dans quelle mesure les exigences associées à une tâche annexe, réalisée durant le mode automatisé de conduite et interrompue dès le début de l'alerte à la reprise, pourrait maintenir un niveau optimal de capacités attentionnelles chez les drivengers et préserver des comportements sécuritaires lors de la reprise effective de la conduite. Les tâches annexes ont été choisies de telle sorte à partager les mêmes réservoirs de ressources attentionnelles, que l'activité de conduite.

4.2. Le niveau d'expertise routière

Les déficits attentionnels (inattention, distraction, interférence) seraient la cause la plus fréquente des accidents routiers (Lee & Strayer, 2004). En 2006, une étude menée par la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA ; « The 100-car naturalistic driving study ») consistait à équiper 100 véhicules de capteurs, afin d'étudier les performances et les accidents de 241 conducteurs sur une durée de 1 an. Les résultats montrent que 78 % de 82 accidents et 65 % de 761 presque-accidents, sont causés par un déficit attentionnel, la cause première étant l'usage d'un téléphone portable (Klauer et al., 2006). De plus, les jeunes conducteurs sont 5 fois plus impliqués dans les accidents et presque-accidents causés par un

déficit attentionnel, que les plus âgés, ce qui peut être expliqué par leur âge (McGwin Jr & Brown, 1999), mais également par leurs niveaux d'expertise routière. En effet, selon Mayhew et al. (2003), les novices auraient un risque plus élevé que les experts d'être impliqué dans des accidents et collisions, risque étant particulièrement accru durant les 6 premiers mois de conduite. L'étude menée sur 1396 rapports de la police Californienne par Lestina & Miller (1994) a mis en évidence l'implication plus élevée des novices dans les accidents causés par un déficit attentionnel, en comparaison aux conducteurs expérimentés. Plus précisément, les résultats révèlent que 39 % des accidents impliquant des conducteurs novices sont causés par une exploration déficitaire de la scène routière, 18% par un non-respect des réglementations, 11% par un échec du contrôle du véhicule et 9% par des excès de vitesse.

La proportion accrue de déficits attentionnels et de risques accidentels encourus chez les novices, peut être expliquée par la faiblesse des automatismes et des stratégies visuelles en cours d'acquisition avec la pratique de l'activité de conduite. Les conducteurs novices n'ayant pas automatisé le niveau opérationnel de l'activité de conduite (i.e., relatif au contrôle du véhicule ; Michon, 1985), un seuil plus élevé de ressources attentionnelles est requis, ce qui peut les mener à un état de surcharge mentale et à des performances de conduite dégradées (Paxion et al., 2015 ; Schneider et Shiffrin, 1977). Leur faible expérience de conduite est également responsable de comportements visuels peu stratégiques et efficaces, ainsi qu'à un modèle mental peu développé de l'activité de conduite, contribuant d'autant plus à augmenter les exigences requises par la conduite et à diminuer leur conscience de la situation (Heikoop et al., 2016; Underwood et al., 2009). Étant donné que l'expertise routière se construit par l'exposition répétée et continue aux diverses situations constituant l'activité dynamique de conduite (Logan, 1988; Michon, 1985; Rasmussen, 1983; Schneider & Shiffrin, 1977), les drivengers actuels et futurs des véhicules automatisés pourraient bien ne jamais atteindre un

niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires, lorsqu'ils devront reprendre le contrôle de leur véhicule.

Dans un contexte de conduite automatisée, les recherches ont jusqu'ici mis en évidence que les conducteurs experts d'âge moyen retrouvent une conscience optimale de la situation, plus rapidement que les jeunes conducteurs novices, en ce qui concerne le regard vers les dangers potentiels (c'est-à-dire dans un délai d'au moins 6 secondes contre 8 secondes après la demande de prise en charge ;Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016). Ce temps supplémentaire nécessaire aux novices, pour retrouver une conscience optimale de la situation, peut être expliqué par le modèle MART (Young & Stanton, 2002a, b, 2007, 2020). Étant donné que la conduite est plus exigeante pour les novices, la reprise du contrôle, dans le cadre de la conduite automatisée, serait plus exigeante que pour les experts. Ainsi, les novices nécessiteraient plus de temps que les experts afin que leurs ressources attentionnelles, temporairement rétrécies, s'ajustent aux ressources requises par la tâche de reprise de la conduite. Les novices nécessiteraient ainsi un temps plus conséquent que les experts, afin que leurs performances de conduite retrouvent un niveau optimal, c'est à dire comparable à celles observées en conduite manuelle. Il apparaît cependant peu clair dans quelle mesure les différences observées par Samuel et al. (2016) et Wright et al. (2016) sont dues à l'âge ou à l'expérience de conduite, car ces deux facteurs internes peuvent accroître le risque d'accident dans des contextes de conduite non automatisée (Falkmer & Gregersen, 2005; Gershon et al., 2019; McGwin Jr & Brown, 1999). Un des objectifs des travaux menés, dans le cadre de cette thèse, sera alors d'évaluer le comportement visuo-attentionnel ainsi que les performances de reprise des drivengiers, en fonction de leur niveau d'expertise routière, tout en contrôlant leur âge.

4.3. Les points clés sur les facteurs impactant les comportements des conducteurs et des drivengers

- Différents facteurs internes ou externes à l'individu peuvent impacter ses performances de conduite tels que le niveau d'expertise routière, la nature de tâche menée durant le mode automatisé ou en parallèle de la conduite manuelle ainsi que la complexité et la criticité de la situation routière rencontrée.
- La reprise de la conduite est une tâche critique et exigeante, où les performances des drivengers sont altérées et les risques augmentés, en comparaison avec une tâche de conduite manuelle « classique ».
- Les facteurs identifiés comme à risque, dans un contexte de conduite manuelle, peuvent être d'autant plus critique dans un contexte de conduite automatisée dans la mesure où l'attention des drivengers est dégradée et la demande de la tâche élevée.
- Dans la mesure où ce type de véhicules s'insèrent progressivement sur nos routes, il est désormais crucial d'évaluer les risques émergents de cette technologie et des moyens visant à les réduire, ce qui est l'objet de cette thèse.
- Dans cet objectif, il convient d'étudier les processus psychologiques intervenant dans cette activité, ainsi que les facteurs pouvant l'impacter, afin de mieux comprendre les causes des comportements dégradés.

5. Objectifs et overview de la thèse

Le premier objectif de cette thèse est de mieux comprendre les processus intervenant dans la tâche de reprise de la conduite et les causes des comportements dégradés, observés dans

la littérature. Ainsi, cet objectif vise à examiner la dynamique des ressources attentionnelles des drivengers dans un contexte d'automatisation de niveau 3, au regard du modèle des ressources attentionnelles malléables (MART, Young and Stanton, 2002a, b, 2007). Le deuxième objectif est d'évaluer l'impact de facteurs internes et externes à l'individu sur ses capacités à reprendre la conduite. Nous nous sommes ici particulièrement focalisés sur deux facteurs : le niveau d'expertise routière et la demande relative à la tâche annexe. Notre troisième objectif est d'apporter des préconisations, quant aux moyens de réduire les risques présents lors de la reprise, notamment à travers l'évaluation de l'impact de la demande relative à la tâche annexe menée durant le mode automatisé. Finalement, notre quatrième et dernier objectif est de proposer un modèle unifié du comportement des drivengers en conduite automatisée de niveau 3, en intégrant les modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles multiples, des ressources attentionnelles malléables et du switch attentionnel.

Afin de répondre à ces objectifs, quatre études expérimentales ont été menées, dont trois sur simulateur de conduite. La première étude avait pour objectif d'évaluer la facilité d'utilisation des véhicules automatisés, et plus précisément leur perception de la difficulté de la reprise en fonction de facteurs sélectionnés comme majeurs. Les facteurs étaient situationnels (i.e., durée du mode automatisé, densité du trafic) et relatifs à la tâche (i.e., écouter de la musique, discuter avec le passager, jouer à un jeu sur la tablette). Le deuxième objectif était d'identifier des profils de difficulté perçue de la reprise de la conduite. Les trois autres études s'intéressaient aux comportements des drivengers, dans des situations de reprise de la conduite, en les immergeant dans un environnement de conduite, simulé et écologique. Plus précisément, la deuxième étude menée avait pour objectif d'investiguer comment les drivengers se préparent à la reprise de la conduite, en fonction de leur niveau d'expertise routière. La troisième étude avait pour objectif de mieux comprendre pourquoi les novices ont des performances de reprise particulièrement dégradées, lors de la reprise, en comparaison avec les experts. Plus

précisément, l'objectif était ici d'évaluer dans quelle mesure le coût associé au comportement de switch, entre la tâche annexe et la tâche de reprise de la conduite, pouvait expliquer les comportements détériorés de reprise observés chez les novices dans la littérature. Finalement, la quatrième étude avait pour objectif d'évaluer dans quelle mesure la réalisation d'une tâche annexe exigeante pouvait maintenir les capacités attentionnelles des drivengers, en fonction de leur niveau d'expertise routière. Cette étude permettait ainsi d'évaluer le modèle MART dans un contexte écologique de conduite automatisée de niveau 3.

Alors que la première étude utilisait un protocole par scénario, les trois autres études menées dans le cadre de cette thèse utilisaient un protocole se déroulant sur le simulateur de conduite de l'Université Toulouse II Jean-Jaurès, à la Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse (MSHS-T). Diverses mesures ont été utilisées : des mesures comportementales (e.g., contrôle latéral et longitudinal du véhicule, temps de réactions, mouvements oculaires), physiologiques (e.g., mesures cardiaques et pupillométrie en tant qu'indicateur de la charge mentale), auto-rapportées (e.g., NASA-TLX en tant qu'évaluation de la charge mentale subjective, questionnaire sur l'engagement dans la tâche annexe).

PARTIE EMPIRIQUE

Dans cette partie empirique, quatre chapitres seront présentés, chacun en lien avec une des études expérimentales menées. Les chapitres suivants présenteront successivement un paragraphe introductif au regard de nos objectifs généraux et des liens que l'étude en question entretient avec les autres, un résumé de l'article en français, l'article tel qu'il a été soumis ou publié, ainsi que les points essentiels à retenir :

- **Chapitre 1** : Impact des facteurs relatifs à la tâche et à la situation sur la difficulté perçue de la reprise.
- **Chapitre 2** : Comment les drivengers se préparent-ils à reprendre le volant ? Effet du niveau d'expertise routière sur leur comportement visuo-attentionnel.
- **Chapitre 3** : Reprise de la conduite et switch attentionnel : Vers une explication des performances dégradées chez les novices.
- **Chapitre 4** : Comment améliorer les capacités des drivengers à reprendre le volant ? Impact des caractéristiques de la tâche annexe chez les conducteurs novices et experts.

Chapitre 1

Impact des facteurs relatifs à la tâche et à la situation sur la difficulté perçue de la reprise.

Ouddiz, S., & Lemercier, C. (soumis le 01/07/2024). How difficult is it perceived to takeover in a level 3 automated vehicle? Investigation of the ease of use according to task and situational factors.

1. Introduction au chapitre

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'impact des facteurs relatifs à la tâche et à la situation sur la difficulté perçue de la reprise. Cette étude a fait l'objet d'un article soumis dans une revue à comité de lecture le 1^{er} juillet 2024. Contrairement aux trois suivantes, cette étude a été réalisée à partir d'un protocole par scénario, sur la base de la Théorie de l'Intégration de l'Information (IIT, Anderson, 1982, 2013, 2014). Avant d'évaluer les comportements des drivengers en situation écologique de conduite automatisée de niveau 3 et de sa reprise, nous nous sommes intéressés à leur perception. Plus précisément, nous nous sommes intéressés ici à la perception qu'ont les drivengers de la difficulté relative à la reprise de la conduite. Nous avons également évalué leur perception de l'impact de facteurs relatifs à la situation routière et à la tâche annexe sur cette difficulté de reprise. Des profils ont également été mis en évidence en fonction de leur perception et de l'impact des facteurs sur cette perception de la difficulté de la reprise. Ainsi, cette étude nous a permis de mieux comprendre comment la reprise de la conduite était perçue et acceptée chez les individus. Ceci nous a également permis d'identifier les facteurs internes ou externes à l'individu perçus comme pouvant impacter le plus la

difficulté à reprendre le volant, et ainsi leurs capacités à reprendre la conduite après un trajet automatisé.

2. Résumé de l'étude

2.1. Introduction

L'un des objectifs de la conduite automatisée est de réduire les risques d'accident en éliminant l'intervention humaine. Pour que les véhicules automatisés soient développés et utilisés de manière sécuritaire, ils doivent être acceptés. L'acceptation dépend de plusieurs facteurs, dont la facilité d'utilisation (Venkatesh et al., 2003). Bien que les individus perçoivent généralement les véhicules automatisés de niveau 3 (i.e., le niveau le plus élevé actuellement, SAE 2016) comme étant faciles à utiliser, les recherches montrent que les conducteurs ont des difficultés à reprendre la conduite manuelle après un trajet automatisé (cf. Navarro, 2018, pour une revue). Le premier objectif de cette étude est d'évaluer plus précisément la facilité d'utilisation des véhicules automatisés de niveau 3 en se concentrant sur la période problématique de la reprise. Nous nous sommes intéressés à l'impact des facteurs, connus pour avoir un fort impact sur la performance de reprise, sur la perception de la difficulté de la reprise. Les facteurs sélectionnés étaient situationnels (i.e., durée du mode automatisé, densité du trafic) et liés à la NDRT (i.e., écouter de la musique, discuter avec un passager, jouer à un jeu sur la tablette). Le second objectif est d'identifier des profils d'individus en fonction de leur perception de la difficulté de la reprise et de l'impact des facteurs étudiés sur cette perception. On supposait que 1) la reprise est perçue comme plus difficile après une longue période de conduite automatisée (45 minutes) par rapport à une courte période (5 minutes), 2) la densité du trafic augmente la difficulté perçue de la reprise de contrôle, avec une reprise plus difficile dans des conditions de trafic dense, 3)

les tâches non liées à la conduite augmentent la difficulté perçue de la reprise de contrôle, particulièrement les tâches visuelles et motrices comme jouer à un jeu sur une tablette.

2.2. Méthode

Cette étude en ligne utilisait un protocole par scénarios, basé sur la méthodologie de la Théorie de l'Intégration de l'Information (Anderson, 1982, 1008, 2013, 2014). La perception des conducteurs concernant la difficulté de reprise a été évaluée en fonction de nos 5 facteurs à travers 32 scénarios. 805 participants ont été recrutés via des groupes Facebook à travers toute la France, et 235 ont été retenus pour les analyses, ayant complété l'intégralité du sondage et possédant un permis de conduire français valide. Les participants devaient évaluer, pour chacun des scénarios, dans quelle mesure il était facile de reprendre la conduite, sur une échelle allant de 1 (Pas du tout) à 20 (Extrêmement). Ainsi, chaque participant évaluait toutes les combinaisons de facteurs, présentés dans un ordre aléatoire. Trois analyses ont été conduites. La première est une ANOVA à mesures répétées avec nos 5 facteurs, menée sur l'ensemble de l'échantillon total. Cette première analyse a pour but d'évaluer l'impact de nos facteurs et leurs potentielles interactions sur la perception générale de la difficulté de la reprise. La deuxième est une analyse en cluster, utilisée pour identifier les profils des répondants en fonction de leur perception de la difficulté de la reprise et de l'impact des facteurs sur cette perception. Finalement, une ANOVA a été menée au sein de chaque cluster ou profil identifié, afin d'évaluer l'impact des 5 facteurs et leurs interactions sur la perception de la difficulté de la reprise pour chacun des profils identifiés dans l'analyse précédente.

2.3. Résultats et discussion

Les résultats révèlent que tous les facteurs influencent la perception de la difficulté de la reprise. Trois profils de conducteurs sont mis en évidence : les réticents à la reprise, les adaptifs et les confiants. Les profils sont impactés différemment par les facteurs manipulés. En premier lieu, les individus du profil « adaptif » (i.e., 47,89% de l'échantillon) ont une perception appropriée de la reprise. En effet, leur difficulté perçue de la tâche de reprise est modérée et adaptée à la présence des facteurs situationnels et relatifs à la tâche. Les résultats montrent cependant que plus de la moitié des individus ont une perception inadéquate de la reprise (52,14%, dont 19,23% du profil « réticent » et 32,91% du profil « confiant »). D'une part, les individus du profil « réticent » perçoivent la reprise comme étant très difficile, indépendamment de la présence des facteurs. Ainsi, les individus de ce profil ne perçoivent aucun impact des facteurs étudiés sur la difficulté à reprendre la conduite manuelle. D'autre part, les individus du profil « confiant » perçoivent la reprise comme étant très facile. Bien que leur perception de la difficulté de la reprise soit influencée par la présence des facteurs, ils la considèrent comme facile, même dans les conditions sont les plus défavorables (par exemple, reprendre la conduite après 45 minutes d'autonomie, dans une situation à trafic dense, après avoir joué à un jeu tout en écoutant de la musique et en discutant avec le passager).

Il s'avère donc que la perception de la difficulté de la reprise est problématique pour les individus des profils « confiant » et « réticent » dans la mesure où leur perception est inadéquate, la reprise étant perçue comme trop facile ou trop difficile. Cette mauvaise perception peut conduire à un faible niveau d'acceptation du système et une non-utilisation (profil « réticent » ; Carlson et al., 2014; Gold et al., 2015) ainsi qu'à une mauvaise utilisation et des comportements à risques lors de la reprise (profil « confiant » ; Abe et al., 2002; Carlson et al., 2014; Llaneras et al., 2013). Il est donc impératif de développer, évaluer et déployer des

solutions visant à prévenir les risques émergents des véhicules automatisés, que ce soit par la prévention directe ou par l'utilisation de dispositifs d'assistance à la reprise.

3. Article 1: How difficult is it perceived to takeover in a level 3 automated vehicle?

Investigation of the ease of use according to task and situational factors

Abstract

One goal of automated driving is to mitigate risks by minimizing human intervention. However, widespread acceptance of automated vehicles hinges on their perceived ease of use, particularly during takeover scenarios. This online survey investigates the perceived difficulty of takeover in Level 3 Automated Vehicles, focusing on factors influencing takeover performance such as duration of automated mode and traffic density, as well as Non-Driving-Related Tasks like listening to music or engaging in conversation. Using Anderson's experimental protocol based on Integrated Information Theory, 235 drivers aged 18-72 rated takeover difficulty across 32 realistic scenarios varying in these factors. Results indicate significant impacts of all factors on takeover perception, identifying three distinct driver profiles: takeover averse, adaptive, and confident. Findings underscore implications for vehicle acceptance and risk management in automated driving.

Keywords: automated driving, ease of use, takeover difficulty, non-driving-related task, takeover situation

1. Introduction

The World Health Organization (WHO) estimates that more than 50 million people have died in road accidents since the invention of the automobile, and 1.35 million in 2016 (WHO, 2018). The primary cause of these accidents is attributed to human error, with 78% of accidents caused by driver inattention (Dingus et al., 2006). Automated driving would drastically reduce accidents and road fatalities by gradually removing the human from the driving loop (Bertoncello & Wee, 2015; Litman, 2020). Recently on our roads (i.e., September 2022 in France), Level 3 automated vehicle (SAE2021) is the first level allowing the driver to disengage from the driving task when the system works. The driver, now referred to as the 'drivenger' (i.e., a contraction of 'driver' and 'passenger'), will need to be able to disengage from the Non-Driving-Related Task (NDRT) performed during the automated mode in order to resume driving in case the system becomes inoperable. Automation would thus make it possible to partially (i.e., from level 3) and then totally (i.e., level 5) free the human from the driving task. The expected benefits are a reduction in effort related to the driving task and an increase in the time available for other tasks. The acceptance of automated vehicles by humans thus appears necessary for their use and development in order to achieve these safety and practical benefits.

Acceptance of a new technology is defined as the individual's willingness to use it, a prerequisite for its future use. The Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT, Venkatesh et al., 2003) incorporates eight major models of technology acceptance (e.g., TAM, Venkatesh & Davis, 2000). According to UTAUT, four factors predict behavioral intention to use and actual use: expected performance, social influence, facilitating conditions, and ease of use. Expected performance refers to the perceived usefulness and benefits of the technology. Social influence involves the perceived use of the technology by one's social environment. Facilitating conditions are the perceived resources and abilities to use the technology. Ease of use is the perceived effort required to use the technology (Ain et al., 2016;

Venkatesh et al., 2003). Facilitating conditions directly influence actual use, while other factors influence behavioral intention, which then determines actual use. The UTAUT2 model (Venkatesh et al., 2012) adds three factors: hedonic motivation (individual enjoyment), price value (trade-off between cost and benefits), and habits (automatic behaviors from learning). However, studies on level 3 automated vehicle acceptance do not yet include price value and habits due to their recent emergence and lack of user experience (Nordhoff et al., 2020). To ensure level 3 automated vehicles are acceptable and used, they must align with individual skills and social environments, be appreciated, and be perceived as useful and easy to use.

More than 9000 European drivers rated their acceptance of level 3 automated vehicle in a study conducted by Nordhoff et al. (2020). The results indicated that the intention to use a level 3 automated vehicle was predicted by hedonic motivation, followed by social influence and expected performance. Facilitating conditions and ease of use did not explain the intention to use. The authors point out the methodological limitations of assessing ease of use in their study. Indeed, 71% of the participants considered it easy to use a level 3 automated vehicle. However, the information given to the participants did not specify that the interaction with these vehicles requires the driver to interrupt the current NDRT in order to resume the driving task in case of system inoperability. In addition, the participants in this study had no experience with this type of vehicle, so they did not have this knowledge. In a study conducted by Xu et al. (2018), participants experienced a level 3 automated vehicle driving trip before assessing their acceptance. The results indicated that ease of use was a major predictor of intention to use. The lack of knowledge about the interaction with these vehicles would thus be an explanation for the minimization of the "ease of use" factor in the criteria determining acceptance (Nordhoff et al., 2020).

Studies on the behaviour of drivers agree that interaction with a level 3 automated vehicle is not an easy task. For example, it has been shown that their takeover performance is

degraded in terms of a higher number of collisions, greater instability in the longitudinal and lateral control of the vehicle, or in terms of inefficient visual scanning of the road scene (e.g., Merat & Jamson, 2009; Navarro, 2019; Shen & Neyens, 2017; Strand et al., 2014). The literature thus shows the difficulty that drivengers have in getting back behind the wheel after experiencing a ride in automated driving. This deteriorated performance is generally explained by the drivengers' disengagement from the driving task during the automated mode. They are then "out of the loop": they allocate little or no attention to the driving task and in particular to the visual exploration of the road scene (Louw et al., 2017; Merat et al., 2019; Zeeb et al., 2015). In the event that the inoperative the system alerts to the upcoming deactivation of the automated mode, the drivenger must return to the loop. Research shows, however, that drivengers do not have enough time to reacquire optimal situational awareness, allowing them to perceive, understand and anticipate the takeover driving situation (Endsley, 1995; Lu et al., 2017; Vlakveld et al., 2018). Thus, takeover is a high-risk accident situation where drivengers' outside the loop have difficulties in forming a comprehensive and optimal representation of the driving situation encountered during the takeover.

The takeover difficulty can be increased depending on what the drivenger does during the automated mode and the situational factors encountered. Engaging in a non-driving-related task (NDRT) during automated mode can elevate the risks involved in the takeover (Merat et al., 2012; Müller et al., 2021) due to decreased engagement in the driving task and the amplification of the out-of-the-loop effect (Jamson et al., 2013). Additionally, switching between the NDRT and driving is costly, requiring reconfiguration of task parameters and inhibition of the previous task, leading to degraded performance (Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003; Vandierendonck et al., 2010). The characteristics of the NDRT also impact takeover difficulty, with tasks using the same attentional resources as driving (e.g., visual encoding and motor response) resulting in poorer performance compared to those using different resources

(e.g., auditory encoding, vocal response, Wandtner et al., 2018). According to the Multiple Resource Theory (Wickens, 2008), tasks sharing similar modalities overload the same resource pools, leading to degraded performance due to insufficient attentional resources. During an alert, drivers often remain engaged in the NDRT while resuming driving, exacerbating the overload state (Ouddiz et al., 2020). Situational factors such as traffic density and automated mode duration further affect takeover performance. Dense traffic increases complexity and demand (Gold et al., 2016; Radlmayr et al., 2014; Paxion et al., 2015), while longer automated mode durations impair performance and increase risks due to the out-of-the-loop effect and decreased situational awareness (Feldhütter et al., 2017; Greenlee et al., 2018; Singh et al., 2009; Naujoks et al., 2018). Increased mental workload (MWL) over time also contributes to impaired performance (Paas et al., 2003a, b; Xie & Salvendy, 2000). Thus, both NDRT-related and situational factors significantly impact takeover difficulty and the associated accident risks.

In order to better understand the acceptance of level 3 automated vehicle, it is necessary to better understand individuals' perceptions of their ease of use. Since the problem with these vehicles is the difficulty of takeover depending on the factors encountered (i.e., situational and NDRT-related), their ease of use must be evaluated with respect to this takeover task. The first objective of this study was to evaluate the effect of these factors and their potential interaction on the perception of the takeover difficulty. The second was to identify profiles of respondent according to their perception of the takeover difficulty and the impact of the factors studied on the takeover difficulty. More precisely, we are in two situational factors. The first is the traffic density, assuming that it is more difficult to takeover in high than low traffic density. The second is the duration of the automated drive as we expected that a high duration decrease situation awareness and increase takeover difficulty. We also are interested in task factors by manipulating the presence of three task: playing a game on a tablet, listening to music at the radio and discussing with the passenger. Task were selected to be the preferred and most

frequently carried out while driving (i.e., listening to music; Dibben & Williamson, 2007) or plan to be in a context of level 3 automated driving (i.e., playing a game on a tablet, discussing with the passenger, Kim et al., 2015; Yoon & Ji, 2019). We also selected these three tasks as they are very different from each other and for their expected different impact on takeover difficulty. We assumed that resuming driving while engaging in the game task on the tablet (i.e., visual-motor task) is more difficult than while discussing with a passenger (i.e., auditory-vocal task) or listening to music (i.e., auditory task requiring no response). We also presumed that the combination of the three tasks lead to the most difficult takeover, particularly when traffic density and duration of automated drive are high. To this aim, we decide to use the experimental protocol based on the Anderson's Integrated Information Theory (Anderson, 1982, 2013, 2014). Anderson's methodology allows researchers to investigate multiple factors and their interactions simultaneously by evaluating combinations rather than individual elements. It employs a complete factorial design to assess the impact of each factor on overall judgments and to study interactions comprehensively (Anderson, 2008). This scenario-based methodology allows us to study driver's perception with a validated protocol with a reduced time and money cost than simulated studies (e.g., Delmas et al., 2022; Hurgobin et al., 2020; Monsaingeon et al., 2020; Trémolière & Djeriouat, 2016). Through an online study, we evaluate drivers' perception of takeover difficulty according to our 5 factors and their mutual interactions by using a complete factorial plan. Participants have to assess all the factors combination (i.e., 32 scenarios) to evaluate the impact of each factor and their interactions on drivers' judgments. Finally, a cluster analysis was used to identify profiles of respondent according to their perception of the takeover difficulty and the impact of factors on this perception.

2. Method

2.1. Participants

805 participants were recruited via Facebook groups from all over France. The responses of 235 of them have been retained because they completed the whole survey and have a French valid driving license. The sample was composed of 70 men and 165 women, aged from 18 to 72 years old ($M = 31.74$; $SD = 12.20$). Among them, 96 had never experienced a drive in a level 1 or 2 automated car, 41 between 2 and 4 time and 98 had already experienced it 5 or more time.

2.2. Materials and measures

32 scenarios were constructed according to our five within-participants factors: the duration of the automated drive (low: “5 minutes” vs high: “45 minutes”) x the traffic density (low: “a very few” vs high: “a lot of”) x the game played on the tablet (without: “does nothing” vs with “is playing a game on his tablet”) x the discussion with the passenger (without: “is not chatting with him” vs with “is chatting with him”) x the music on the radio (without: “the radio is turned off” vs with: “the radio is playing music”). For example: “Jean and his friend are on their way to their vacation. The car has been driving in automated mode for **45 minutes**. During this time, Jean is **playing a game on his tablet**. His friend is in the front passenger seat. He is **discussing with him**. The **radio is playing music**. There are **a lot of vehicles on the road**. The car alerts Jean that the automated mode will be deactivated in the next 10 seconds”. Participants have to rate on a scale from 0 “Not at all” to 20 “Extremely” the following question: “If you were Jean, how easy would it be for you to resume the manual driving?”.

According to the sex and the age of the participant, the name associated to the scenario was changed in order to make easier to put themselves in the role of the protagonist (Delmas et al., 2022; Monsaingeon et al., 2020). Four common French names were used: for participants

under 40 years old, Julien was used for men and Julie for women and for participants of 40 years old and more, Jean was used for men and Marie for women. The 32 scenarios were randomly ordered.

In addition to the scenario's questions, participants were asked to indicate the following informations: age, sex, level of appreciation of driving (on a 20-points scale), number of times experiencing an automated drive in a level 1 or 2 (i.e., 0, 1, 2, 3, 4, 5 or more), level of appreciation of automated driving (on a 20-points scale), level of driving experience (i.e., number of km travelled for the last year, number of years of driving experience).

2.3. Procedure

The general description of the study, the inclusion criteria (i.e., to own the French driving license) and the online study link were disseminated through posts on various Facebook groups to recruit participants. Individuals interested in participating were directed to the survey hosted online. Participation was voluntary and anonymous, with participants providing informed consent before proceeding to the questionnaire as well as the study duration (i.e., approximately 20 minutes). Participants who have not the French driving license were excluded of the experiment. They were asked to indicate their age and their sex. They were then assigned to the corresponding name condition. The general description of the study process was given: they will begin by a familiarization phase, then the experimental one and finally a driving habits questions phase. The Level 3 automated system was explained to them, considering the situations occurring in the scenarios. For the familiarization phase, 16 scenarios were presented, including the most extremes ones for a wide range of responses to ensure the familiarization process. Participants were told to read each story carefully and respond by considering all the informations available. At the end of the familiarization phase, they were told to read their answer with the possibility to modified them. Participants were informed that they will no

longer be able to modify their answer in the experimental phase. For the last phase, questions about their driving habits were asked and they were finally thanked for their participation, with the possibility to enter their email address if they want the results of the study.

2.4. Data analysis

In our study, we utilized data from the Open Science Framework repository. The dataset by Sharon Ouddiz and Céline Lemerrier titled 'Perception of takeover difficulty' is available on OSF dataset (<https://doi.org/10.17605/OSF.IO/X5N8A>). Three analyses were conducted, respectively in the objectives of 1. Determine the effects of the 5 factors on the difficulty to takeover, 2. Identify profiles of responses, 3. Determine the effects of the 5 factors on each profile identified.

In accordance with (Anderson, 2013), the first analysis was an ANOVA conducted on the whole sample, with five within-subject factors: the duration of the automated drive (low vs high) x the traffic density (low vs high) x the game played on the tablet (without vs with) x the discussion with the passenger (without vs with) x the music on the radio (without vs with). We set the significant threshold at $p < 0.001$ given the multiplicity of comparisons. Post-hoc tests were computed with a Tukey correction. Partial eta-squared was computed for the effect size. We decided to focus only on main effects and two-ways interactions given the number of factors and the potential flawed interpretation. In the second analysis, we used a k-means clustering (i.e., nonhierarchical centroid-based method with Euclidean distances) as recommended by Hofmans & Mullet (2013) to identify profiles in our data. The Elbow method was used to choose the number of clusters with the smallest within-cluster variability (Kodinariya et al., 2013). The third analysis was an ANOVA conducted for each cluster identified, with the same design than the first analysis. Results are described according to the difficulty to takeover: the lower the score of ease to takeover, the higher the difficulty to takeover.

2.4. Ethical considerations

At the time this research was conducted, obtaining ethical approval from an ethics committee was not mandatory in France for the type of study we performed. However, the research was conducted in strict accordance with the ethical guidelines provided by my research director and the members of the UMR CNRS CLLE Laboratory (TIMH lab) at the University Toulouse 2 Jean-Jaurès. All procedures involving participants were reviewed, approved and performed in accordance with the ethical standards as laid down in the Declaration of Helsinki. Participants were informed about the nature of the study, and their consent was obtained prior to their participation. Additionally, all data collected during the study were anonymized to protect the privacy and confidentiality of the participants.

3. Results

3.1. Analyses conducted on the whole sample

The ANOVA indicated that all the factors have a main effect on the difficulty of takeover (cf. Table 1 below for descriptive statistics):

- (1) Duration of the automated drive, $F(1, 234) = 30.06, p < 0.001, \eta^2 = 0.11$. It was more difficult to resume the driving task after 45 than 5 minutes of automated drive.
- (2) Traffic density, $F(1, 234) = 71.36, p < 0.001, \eta^2 = 0.23$. Resume the driving task was rated more difficult when there was a lot of vehicles on a road than a very few.
- (3) Game, $F(1, 234) = 156.93, p < 0.001, \eta^2 = 0.4$. It was more difficult to takeover when playing than not playing a game on the tablet.
- (4) Discussion, $F(1, 234) = 31.34, p < 0.001, \eta^2 = 0.12$. The difficulty of takeover was higher when there was a discussion with the passenger than without discussion.
- (5) Music, $F(1, 234) = 27.88, p < 0.001, \eta^2 = 0.11$. It was more difficult to resume manual driving with music on the radio than with the radio turned off.

Table 1

Mean and standard errors of ease to takeover ratings, reported by the whole sample according to duration of the automated drive, traffic density, game, and music.

<i>Factor</i>	<i>M (SD)</i>
<i>Duration of the automated drive</i>	
Low	11.63 (2.36)
High	10.46 (2.27)
<i>Traffic density</i>	
Low	12.05 (0.22)
High	10.03 (0.15)
<i>Game</i>	
Without	12.99 (1.18)
With	9.10 (1.39)
<i>Discussion</i>	
Without	11.34 (2.36)
With	10.74 (2.38)
<i>Music</i>	
Without	11.26 (2.41)
With	10.83 (0.17)

According to the effect size (i.e., η^2 , partial eta-square), the weight of the factors was the following: **game**, **traffic density**, **discussion** and at the same last position, **duration of the automated mode** and **music**.

The ANOVA also revealed three two-way interactions:

- (1) Between **duration of the automated drive** and **discussion** (cf. Table 2 below), $F(1, 234) = 3.98$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.02$. However, Tukey post-hoc test did not reveal an interaction effect, all the comparisons being significant, $p < 0.001$, excepted between the condition duration 5 minutes with discussion and the condition duration 45 minutes without discussion that is marginally significant, $p = 0.058$. We can note that resume driving after 5 minutes of automated drive while discussing seem have an equivalent level of difficulty to resume driving after 45 minutes without discussion.

Table 2

Effect of Duration of the automated drive x Discussion interaction on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Duration of the automated drive</i>	<i>Discussion</i>		
5 minutes	Without	11.99	.33
	With	11.27	.33
45 minutes	Without	10.69	.33
	With	10.22	.33

- (2) Between **traffic density** and **game** (cf. Table 3 below), $F(1, 234) = 5.65$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.02$. Again, Tukey post-hoc test did not reveal an interaction effect, all the comparisons being significant, $p < 0.001$. We can note that resume driving in the condition of playing

game in the tablet during the automated drive is more difficult than not playing game, whatever the level of traffic density.

Table 3

Effect of Traffic density x Game on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Traffic density</i>	<i>Game</i>		
Low	Without	14.10	.36
	With	10.01	.36
High	Without	11.89	.36
	With	8.18	.37

(3) Between **discussion** and **music** (cf. Table 4 below), $F(1, 234) = 3.89, p = 0.05, \eta^2 = 0.02$.

Again, Tukey post-hoc test did not reveal an interaction effect, all the comparisons being significant, $p < 0.001$ excepted the comparison between the condition without discussion with music and the condition with discussion without music, *ns*. We can highlight that listening to music without discussing was evaluated an equivalent level of takeover difficulty than discussing without listening to music.

Table 4

Effect of Traffic density x Game on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Discussion</i>	<i>Music</i>		
Without	Without	11.50	.31
	With	11.19	.31

With	Without	11.02	.31
	With	10.47	.32

3.2. Cluster analyses

The elbow method, consisting to choose the number of clusters according to the elbow of the curve (Kodinariya et al., 2013) yielded to choose three clusters. This choice was confirmed by several indicators commonly used to choose the number of clusters: a low number of mean iterations (i.e., six), all the factors involved in the cluster formation at a significant level (i.e., all at $p < 0.001$) and the maximum of significant differences when computing an ANOVA on the 32 scenarios with the cluster as a factor (i.e., only 5 on the 96 comparisons were *ns*).

3.3. ANOVA by cluster

The table 5 below shows the mean and standard deviation of the ease of takeover for each of the three clusters, according to our 5 factors.

Table 5

Means and standard deviations of the ease of takeover for each cluster, regarding duration of the automated drive, traffic density, game, discussion and music.

Factors	<i>Clusters</i>		
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
	(<i>n</i> = 45)	(<i>n</i> = 112)	(<i>n</i> = 77)
	<i>M (SE)</i>	<i>M (SE)</i>	<i>M (SE)</i>
<i>Duration of the automated drive</i>			
Low	4.68 (0.69)	11.03 (4.01)	16.66 (1.28)
High	5.50 (0.72)	8.67 (3.85)	16.01 (1.53)

Traffic Density

Low	4.64 (0.91)	11.67 (0.58)	17.05 (0.65)
High	5.36 (1.08)	8.03 (0.98)	15.62 (0.54)

Game

Without	5.29 (0.99)	13.10 (2.18)	17.42 (1.05)
With	4.88 (0.53)	6.60 (2.54)	15.25 (0.77)

Discussion

Without	5.08 (0.80)	10.40 (4.06)	16.45 (1.32)
With	5.10 (0.85)	9.30 (4.08)	16.22 (1.57)

Music

Without	5.10 (0.82)	10.18 (4.15)	16.51 (1.37)
With	5.10 (1.16)	9.52 (0.81)	16.16 (0.64)

3.3.1. Cluster 1: Takeover averse

The first cluster was called *takeover averse* for their very low rating of the ease to takeover, whatever the factor (i.e., mean rate of factors between 4.64 and 5.50). Contrarily to the ANOVA conducted on the whole sample, there is no main effect of the factor, *ns*. There are three two-ways interactions:

- (1) Between **duration of the automated drive** and **game** (cf. Table 6 below), $F(1, 45) = 5.78, p < 0.05, \eta^2 = 0.11$. Post-hoc tests indicated a tendency of cluster 1 to evaluate the difficulty of takeover higher when they takeover after 45 minutes than after 5 minutes,

only when they played a game during the automated drive (i.e., *ns* under Tukey post-hoc but significant at $p < 0.05$ between the condition duration 5 minutes with game and the condition 45 minutes without game, marginally significant at $p = 0.056$ between the condition 5 minutes with game and the condition 45 minutes with game).

Table 6

Effect of Duration of automated drive x Game on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Duration of automated drive</i>	<i>Game</i>		
Low	Without	5.07	.48
	With	4.29	.43
High	Without	5.52	.61
	With	5.48	.73

(2) Between **duration of the automated drive** and **discussion** (cf. Table 7 below), $F(1, 45) = 4.92$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.1$. However, post-hoc tests, under Tukey of without correction, did not highlight any significant or marginally significant differences.

Table 7

Effect of Duration of automated drive x Discussion on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Duration of automated drive</i>	<i>Discussion</i>		
Low	Without	4.80	.39

High	With	4.55	.39
	Without	5.36	.60
	With	5.64	.66

(3) Between traffic density and game (cf. Table 8 below), $F(1, 45) = 9.24, p < 0.01, \eta^2 = 0.17$. Post-hoc tests only indicate a significant difference without correction between the condition high traffic density without game and the condition low traffic density with game, $p < 0.05$. Other comparisons were *ns*. We can see a tendency for the effect of game only when the density is low.

Table 8

Effect of Traffic Density x Game on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Traffic Density</i>	<i>Game</i>		
Low	Without	5.06	.51
	With	4.22	.43
High	Without	5.53	.56
	With	5.54	.74

3.3.2. Cluster 2: Takeover adaptive

The second cluster was called *takeover adaptive* for their moderate rating of the ease to takeover and their factor discrimination. For this clusters, ANOVA indicated a main effect of the 5 factors (cf. Table 4 above for mean and standard deviation of the factors by cluster) :

(1) Duration of the automated drive, $F(1, 111) = 71, p < 0.001, \eta^2 = 0.39$. The difficulty of takeover was higher after 45 than 5 minutes of automated drive.

- (2) Traffic density, $F(1, 111) = 142.34, p < 0.001, \eta^2 = 0.56$. It was more difficult to resume manual driving with high than low traffic density.
- (3) Game, $F(1, 111) = 223.39, p < 0.001, \eta^2 = 0.67$. Resume the driving task was rated more difficult when playing than not playing a game during the automated drive.
- (4) Discussion, $F(1, 111) = 58.62, p < 0.001, \eta^2 = 0.35$. It was more difficult to takeover when discussing with the passenger than not discussing.
- (5) Music, $F(1, 111) = 31.90, p < 0.001, \eta^2 = 0.22$. The difficulty of takeover was higher when listening to music on the radio than no music.

Regarding the effect size, the order of importance of the factors was: game, traffic density, duration of the automated drive, discussion, music:

There were also two two-ways interactions:

- (1) Between discussion and music (cf. Table 9), $F(1, 111) = 6.96, p < 0.01, \eta^2 = 0.06$. Tukey post-hoc test did not indicate an interaction effect, all comparisons being significant at $p < 0.001$. We can only note that discussing with the passenger led to a more difficult takeover, whatever if there is or not music on the radio.

Table 8. Effect of Discussion x Music on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Discussion</i>	<i>Music</i>		
Without	Without	10.62	.21
	With	10.19	.19
With	Without	9.75	.20
	With	8.84	.21

(2) Between traffic density and game (cf. Table 10), $F(1, 111) = 5.74, p < 0.05, \eta^2 = 0.05$.

Also, Tukey post-hoc test did not indicate an interaction effect, all comparisons being significant at $p < 0.001$. We can only note that playing a game led to a more difficult takeover, whatever the level of traffic density.

Table 9. Effect of Traffic density x Game on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Traffic density</i>	<i>Game</i>		
Low	Without	15.09	.27
	With	8.24	.35
High	Without	11.12	.40
	With	4.95	.26

3.3.3. Cluster 3: Takeover confident

The third cluster was called *takeover confident* for their high rating of the ease to takeover. For this clusters, ANOVA indicated a main effect of 4 of the 5 factors, the discussion being not significant (cf. Table 5 above for mean and standard deviation of the factors by cluster):

- (1) Duration of the automated drive, $F(1, 76) = 5.47, p < 0.05, \eta^2 = 0.07$. It was more difficult to resume manual driving after 45 than 5 minutes of automated drive.
- (2) Traffic density, $F(1, 76) = 20.37, p < 0.001, \eta^2 = 0.21$. The difficulty of takeover was higher when high than low traffic density.
- (3) Game, $F(1, 76) = 32.55, p < 0.001, \eta^2 = 0.3$. It was more difficult to takeover when playing than not playing a game on the tablet.

(4) Music, $F(1, 76) = 7.48, p < 0.01, \eta^2 = 0.09$. Resume the driving task was rated more difficult when listening to music than without music.

Regarding the effect size, the order of importance of the factors was: game, traffic density, music, duration of the automated drive.

There were also three two-ways interactions:

(1) Between duration of automated drive and traffic density (cf. Table 10), $F(1, 76) = 4.57, p < 0.05, \eta^2 = 0.06$. Tukey post hoc test indicated an effect of the duration of the automated drive only when the traffic density was high (i.e., *ns* between 5 and 45 minutes while not playing, higher level of easy to takeover for low than high density while playing a game, $p < 0.001$).

Table 10

Effect of Duration of automated drive x Traffic density on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Duration of automated drive</i>	<i>Traffic density</i>		
Low	Low	17.19	.35
	High	16.14	.34
High	Low	16.91	.26
	High	15.11	.38

(2) Between game and discussion (cf. Table 11), $F(1, 76) = 4.27, p < 0.05, \eta^2 = 0.05$. Tukey post hoc test indicated an effect of discussion only when playing a game (i.e., all $p <$

0.001 excepted between with discussion and without discussion while not playing a game, *ns*).

Table 11

Effect of Game x Discussion on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Game</i>	<i>Discussion</i>		
Without	Without	17.42	.33
	With	17.43	.27
With	Without	15.49	.35
	With	15.01	.37

(3) Between game and music (cf. Table 12), $F(1, 76) = 3.83, p = 0.054, \eta^2 = 0.05$. Tukey post hoc test indicated an effect of music only when playing a game (i.e., all $p < 0.001$ excepted between with music and without music while not playing a game, *ns*).

Table 12

Effect of Game x Music on mean ease of takeover ratings and standard errors.

<i>Factor</i>		<i>M</i>	<i>SE</i>
<i>Game</i>	<i>Music</i>		
Without	Without	17.52	.27
	With	15.50	.35
With	Without	17.33	.29
	With	15.00	.37

4. Discussion

In the present study, we investigated the impact of situational (i.e., traffic density, duration of the automated drive) and task (i.e., playing a game on a tablet, discussing with the passenger, listening to music at the radio) factors on the ease of use of Level 3 automated vehicle. The first aim of this study was to evaluate the effect of these factors (i.e., main and interaction) on the individual perception of the takeover difficulty. The second aim was to identify profiles according to this perception.

Results about situational factors showed that both traffic density and the duration of the automated drive affected the perceived difficulty of takeover. Higher difficulty was observed in high-density or longer duration conditions. Traffic density had a greater impact than drive duration, supporting Merat et al. (2012) and Scharfe et al. (2020), who found resuming driving in high traffic is more complex. Our hypothesis that takeover difficulty is higher after 45 minutes than after 5 minutes of automated driving was confirmed. Longer automated driving increases takeover difficulty due to disengagement from the driving task and potential engagement in non-driving tasks, making it harder to regain situational awareness (Feldhütter et al., 2017; Greenlee et al., 2018; Naujoks et al., 2018; Singh et al., 2009).

Concerning task factors, results revealed a main effect on the perceived difficulty of takeover. Drivers found it harder to take over while playing a game, discussing with a passenger, or listening to music compared to having no non-driving-related task (NDRT). Playing a game had the most impact on takeover difficulty, while listening to music had the least. These findings align with Wandtner et al. (2018), who reported poorer takeover performance and lower safety perception with visual-manual NDRTs compared to auditory-vocal ones. The game NDRT, a visual task requiring motor responses, shares resources with driving, leading to higher mental workload and more task interference (Wickens, 2008). Consequently, drivers rated takeover more difficult while playing a game than discussing with

a passenger or listening to music, as the latter involve fewer shared resources and thus less interference.

The literature shows that the takeover is a task whose difficulty will increase considerably depending on situational and task factors such as those studied in the present experiment (i.e., traffic density, automated mode duration, NDRT modalities; see Navarro, 2019, for a review). In this study, the analyses revealed three profiles varying according to their perception of the takeover difficulty and the impact of situational and task factors. More specifically, half of the individuals (i.e., 52.14% of the sample, 19.23% of the *Takeover averse* profile and 32.91% of the *Takeover confident* profile) had an inadequate perception of the takeover difficulty. On the one hand, individuals in the *Takeover averse* profile perceived the takeover as very difficult, regardless of the situational and task factors present: they did not perceive the impact of these factors on the takeover difficulty. On the other hand, individuals in the *Takeover confident* profile perceive the takeover as being very easy. Although their perception of the takeover difficulty is impacted by the presence of the factors, they consider it to be easy, even when the conditions are the worst (e.g., resuming driving after 45 minutes of autonomy, in a road situation where traffic is dense and after having played a game while listening to music and discussed with the passenger). On the contrary, the second half of the sample (i.e., 47.89%) belonging to the *Takeover adaptive* profile had an adequate perception of the takeover difficulty. These individuals consider the takeover to be moderately difficult (i.e., around 10 out of 20) under favorable conditions. However, the presence of the factors studied and their addition will increase the perceived difficulty. These individuals therefore have an adequate perception of the takeover difficulty, which will adapt according to the situational and task factors present.

Recent research highlights the need to integrate other factors that impact on the intention to use a new technology into acceptance theories (e.g., UTAUT, Venkatesh et al., 2003). For

example, Wanner et al. (2022) evaluated a model derived from UTAUT that incorporates other factors such as trust in the system. The results show that the more trust individuals have in the system, the higher their intention to use it. Acceptance is thus strongly impacted by trust in the system (Gold et al., 2015; Hartwich et al., 2019; Nordhoff et al., 2020; Wanner et al., 2022; Wilkinson et al., 2021). Few studies have so far looked at the links between trust and ease of use factors. However, the three profiles identified in this study seem to be similar to the three trust profiles identified in the literature (i.e., low trust and *Takeover aversive*, high trust and *Takeover confident*, moderate trust and *Takeover adaptive*). Individuals with a very low level of trust in the automated system will have an excessive awareness of the risks present, generating an aversion to the automated system which they will not use or will use very little (Carlson et al., 2014; Gold et al., 2015). On the contrary, individuals with an overconfidence in the system will have a low awareness of the present risks leading to degraded behaviours (e.g., higher reaction time to an alert, lower frequency of monitoring the automated system and the road scene, more involvement in costly NDRTs; (Abe et al., 2002; Carlson et al., 2014; Llaneras et al., 2013). Finally, individuals with a moderate level of trust will have adequate awareness of the risks present, resulting in optimal use and the safest behaviours (Hartwich et al., 2019; Hergeth et al., 2016). Research shows that the level of trust in the system can be changed. For example, more transparency of automated systems (e.g., better explanation of how they work) or more experience with these systems can increase the level of trust (Ekman et al., 2018; Hartwich et al., 2019; Hergeth et al., 2017; Shin et al., 2020). It is therefore necessary to develop solutions to adjust the trust of users of automated vehicles to an optimal level so that they are sufficiently used, and that this use is achieved through safe behaviour.

Reducing the emerging risks of automated vehicles is a major challenge today. Research focuses on identifying factors that increase takeover risks and finding solutions to mitigate them. The literature shows that situational factors (e.g., traffic density, duration of automated

mode) and task factors (e.g., type of NDRT) increase takeover difficulty and risky behaviors (e.g., Feldhütter et al., 2017; Merat et al., 2012; Scharfe et al., 2020; Wandtner et al., 2018). The difficulties associated with the presence of these factors is highlighted in this study through the perception of individuals, and particularly those in the Takeover adaptive profile. Several solutions can reduce takeover risks. For example, Wright et al. (2018) demonstrated the value of auditory aids during takeover. Participants had better situational awareness (40% improvement in hazard detection) with auditory cues describing the risky environment. Rusch et al. (2013) showed similar benefits with visual cues (spatially cueing hazards in augmented reality). These aids would be especially beneficial in unfavorable takeover contexts (e.g., long autonomy duration, dense traffic, NDRT) by improving situational awareness and promoting safe behavior. In addition to direct aids, preventive solutions are needed. Training automated vehicle users in safe NDRT behaviors can reduce takeover risks. According to the multiple resource model (Wickens, 2008), it is safer to engage in NDRTs that use different cognitive resources than driving (e.g., auditory encoding, vocal response) rather than those that use the same resources (e.g., visual encoding, motor response). Evaluating and developing takeover aids and preventive measures for the emerging risks of automated vehicles is essential.

The usability factor is often underestimated in research on the acceptance of level 3 automated vehicles, mainly because participants typically lack experience with these vehicles and studies provide little information on their operation, especially during the takeover between manual and automated modes. For instance, Nordhoff et al. (2020) found no effect of ease of use on the intention to use level 3 automated vehicles, with participants perceiving them as very easy to use. However, behavioral research highlights the importance of this factor and the difficulties encountered during the transition (Navarro, 2018). In fact, two-thirds of individuals (67.12%) perceive the takeover as either always difficult (Takeover averse) or difficult when situational and task-related factors are present (Takeover adaptive). This study identified three

profiles with varying perceptions of ease of use. Using the Anderson method (Anderson, 1982, 2013) immerses individuals in level 3 automated vehicle takeover scenarios, varying situational factors, and providing more ecological insights compared to questionnaire-based acceptability studies. This method is also less expensive than behavioral studies, requiring less time and equipment (e.g., driving simulators).

The present study advances the understanding of variables influencing the difficulty of takeover. However, these results must be interpreted with certain methodological limitations in mind. First, the study is based on written scenarios. Future research should replicate these findings using simulators and real-road studies, as participants might experience more difficulty in real driving conditions. Another limitation is that most participants had no experience with automated driving systems. Previous studies have shown that familiarity with automated driving systems significantly affects trust in these systems (e.g., Oliveira et al., 2019), which could also impact the perceived takeover difficulty (Abe et al., 2002; Carlson et al., 2014; Llaneras et al., 2013). However, this study has identified three profiles of individuals regarding their perception of the takeover difficulty based on the variables identified as having the greatest impact on takeover difficulty. This lack of experience proves valuable as it provides insights into future potential users of these vehicles and potential barriers to their non-use or misuse. Indeed, half of the individuals (Takeover averse and Takeover confident) may choose not to use these vehicles or may misuse them. It is therefore important to inform individuals better about automated vehicles, their operation, and their safety from now on, as well as to adapt the vehicles to human needs so that they are used in an appropriate and safe manner. Despite these limitations, this study is crucial for identifying the most relevant independent variables for future experimental studies using simulators.

5. Conclusion

In this study, the Anderson scenario method was used to further evaluate the usability of Level 3 Automated Vehicles. The scenarios varied according to situational (i.e., traffic density, automated mode duration) and task factors (type of NDRT in terms of its modality), which were selected to strongly impact takeover performance. The results revealed three profiles varying according to their perception of the takeover difficulty. Our results also suggest that individuals in these profiles vary in their confidence in the automated system. Approximately half of the individuals had an adequate perception of the takeover (i.e., *Takeover adaptive*) insofar as it varied according to the presence of situational and task-related factors. On the contrary, the other half of the participants had an inadequate perception of the takeover, considering it either too easy or too difficult. This misperception is capable of leading to non-use of the system due to low acceptance (i.e., *Takeover averse*) and even to unsafe behaviour in the real takeover situation (i.e., *Takeover confident*). It is therefore necessary to develop, evaluate and implement solutions aimed at preventing the emerging risks of automated vehicles, either through prevention or through takeover assistance devices.

Acknowledgements

We would like to thank the participants who took part in this study and the help of the CLLE laboratory.

Funding

This work was supported by the CLLE laboratory (Cognition, Langues, Langages, Ergonomie) and University of Toulouse II Jean-Jaurès (PhD fellowship).

CRedit author statement

Sharon Ouddiz: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization, Project administration, Funding acquisition. **Céline Lemercier:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Resources, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

References

- Abe, G., Itor, M., & Tanaka, K. (2002). DYNAMICS OF DRIVERS' TRUST IN WARNING SYSTEMS. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 363-368.
- Ain, N., Kaur, K., & Waheed, M. (2016). The influence of learning value on learning management system use : An extension of UTAUT2. *Information Development*, 32(5), 1306-1321.
- Anderson, N. H. (1982). *Methods of information integration theory* (Vol. 2). Academic Press.
- Anderson, N. H. (2013). Unified psychology based on three laws of information integration. *Review of General Psychology*, 17(2), 125-132.
- Anderson, N. H. (2014). *A functional theory of cognition*. Psychology Press.
- Bertoncello, M., & Wee, D. (2015). Ten ways automated driving could redefine the automotive world. *McKinsey & Company*, 6.
- Carlson, M. S., Drury, J. L., Desai, M., Kwak, H., & Yanco, H. A. (2014). Identifying factors that influence trust in automated cars and medical diagnosis systems. *2014 aaai spring symposium series*.
- Delmas, M., Camps, V., & Lemerrier, C. (2022). Effects of environmental, vehicle and human factors on comfort in partially automated driving : A scenario-based study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 86, 392-401.
- Dibben, N., & Williamson, V. J. (2007). An exploratory survey of in-vehicle music listening. *Psychology of Music*, 35(4), 571-589.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., & Gupta, S. (2006). *The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment*. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety

- Ekman, F., Johansson, M., & Karlsson, M. (2018). Understanding trust in an AV-context : A mixed method approach. *Proc. 6th Humanist Conf*, 13-14.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37(1), 32-64.
- Feldhütter, A., Gold, C., Schneider, S., & Bengler, K. (2017). How the Duration of Automated Driving Influences Take-Over Performance and Gaze Behavior. In C. M. Schlick, S. Duckwitz, F. Flemisch, M. Frenz, S. Kuz, A. Mertens, & S. Mütze-Niewöhner (Éds.), *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes* (p. 309-318). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53305-5_22
- Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2015). Trust in automation—before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle. *Procedia Manufacturing*, 3, 3025-3032.
- 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*, 58(4), 642-652.
- 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: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 60(4), 465-476. <https://doi.org/10.1177/0018720818761711>
- Hartwich, F., Witzlack, C., Beggiato, M., & Krems, J. F. (2019). The first impression counts—A combined driving simulator and test track study on the development of trust and acceptance of highly automated driving. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 65, 522-535.

- Hergeth, S., Lorenz, L., & Krems, J. F. (2017). Prior familiarization with takeover requests affects drivers' takeover performance and automation trust. *Human factors*, 59(3), 457-470.
- 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>
- Hofmans, J., & Mullet, E. (2013). Towards unveiling individual differences in different stages of information processing : A clustering-based approach. *Quality & Quantity*, 47, 455-464.
- Hurgobin, Y., Le Floch, V., & Lemercier, C. (2020). Effect of multiple extrinsic cues on consumers' willingness to buy apples : A scenario-based study. *Food Quality and Preference*, 81, 103860.
- 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>
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological Bulletin*, 136(5), 849-874. <https://doi.org/10.1037/a0019842>
- Kim, H. S., Yoon, S. H., Kim, M. J., & Ji, Y. G. (2015). Deriving future user experiences in automated vehicle. *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 112-117. <https://doi.org/10.1145/2809730.2809734>

- Kodinariya, T. M., Makwana, P. R., & others. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6), 90-95.
- Litman, T. (2020). *Automated vehicle implementation predictions : Implications for transport planning*.
- Llaneras, R. E., Salinger, J., & Green, C. A. (2013). Human factors issues associated with limited ability automated driving systems : Drivers' allocation of visual attention to the forward roadway. *Driving Assesment Conference*, 7(2013).
- 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>
- Lu, Z., Coster, X., & de Winter, J. (2017). How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving. *Applied Ergonomics*, 60, 293-304. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.003>
- Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). How Do Drivers Behave in a Highly Automated Car? *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : Driving Assessment 2009*, 514-521.
<https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1365>
- 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., Katazaki, 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>
- Monsaingeon, N., Caroux, L., Langlois, S., Hurgobin, Y., & Lemercier, C. (2020). Driver compliance with automation reliability information regarding hazardous environmental circumstances. *Le travail humain*, 4, 343-360.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Müller, A. L., Fernandes-Estrela, N., Hetfleisch, R., Zecha, L., & Abendroth, B. (2021). Effects of non-driving related tasks on mental workload and take-over times during conditional automated driving. *European transport research review*, 13(1), 1-15.
- Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2018). A Review of Non-driving-related Tasks Used in Studies on Automated Driving. In N. A. Stanton (Éd.), *Advances in Human Aspects of Transportation* (Vol. 597, p. 525-537). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60441-1_52
- Navarro, J. (2019). A state of science on highly automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 366-396. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1439544>
- Nordhoff, S., Louw, T., Innamaa, S., Lehtonen, E., Beuster, A., Torrao, G., Bjorvatn, A., Kessel, T., Malin, F., Happee, R., & others. (2020). Using the UTAUT2 model to explain public acceptance of conditionally automated (L3) cars : A questionnaire study among 9,118 car drivers from eight European countries. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 74, 280-297.
- Oliveira, L., Proctor, K., Burns, C. G., & Birrell, S. (2019). Driving style: How should an automated vehicle behave? *Information*, 10(6), 219.
- Organization, W. H. (2018). *World health statistics 2018 : Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. World Health Organization.

- [dataset] Ouddiz, S., & Lemerrier, C. (2024, July 1). Perception of takeover difficulty.
<https://doi.org/10.17605/OSF.IO/X5N8A>
- Ouddiz, S., Paubel, P.-V., & Lemerrier, C. (2020). How do novice and expert drivers prepare for takeover when they are drivers of a level 3 automated vehicle ? Investigation of their visual behaviour. *Le travail humain*, 83(4), 361-378.
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design : Recent developments. *Educational psychologist*, 38(1), 1-4.
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. M. (2003). Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*, 38(1), 63-71. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Overload depending on driving experience and situation complexity : Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*, 51, 343-349. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.014>
- 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>
- Rusch, M. L., Schall, M. C., Gavin, P., Lee, J. D., Dawson, J. D., Vecera, S., & Rizzo, M. (2013). Directing driver attention with augmented reality cues. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 16, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.08.007>
- 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>

- 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>
- Shin, D., Zhong, B., & Biocca, F. A. (2020). Beyond user experience : What constitutes algorithmic experiences? *International Journal of Information Management*, 52, 102061.
- Singh, A. L., Tiwari, T., & Singh, I. L. (2009). Effects of automation reliability and training on automation-induced complacency and perceived mental workload. *Journal of the Indian Academy of Applied Psychology*, 35(2009), 9-22.
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2021). *Taxonomy and Definitions for terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- 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>
- Trémolière, B., & Djeriouat, H. (2016). The sadistic trait predicts minimization of intention and causal responsibility in moral judgment. *Cognition*, 146, 158-171.
- Vandierendonck, A., Liefoghe, B., & Verbruggen, F. (2010). Task switching : Interplay of reconfiguration and interference control. *Psychological bulletin*, 136(4), 601.
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the technology acceptance model : Four longitudinal field studies. *Management science*, 46(2), 186-204.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology : Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478.

- Venkatesh, V., Thong, J. Y., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology : Extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS quarterly*, 157-178.
- Vlakveld, W., van Nes, N., de Bruin, J., Vissers, L., & van der Kroft, M. (2018). Situation awareness increases when drivers have more time to take over the wheel in a Level 3 automated car : A simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 917-929. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.07.025>
- Wandtner, B., Schömig, N., & Schmidt, G. (2018). Effects of Non-Driving Related Task Modalities on Takeover Performance in Highly Automated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 60(6), 870-881. <https://doi.org/10.1177/0018720818768199>
- Wanner, J., Herm, L.-V., Heinrich, K., & Janiesch, C. (2022). The effect of transparency and trust on intelligent system acceptance : Evidence from a user-based study. *Electronic Markets*, 1-24.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Wilkinson, D., Alkan, Ö., Liao, Q. V., Mattetti, M., Vejsbjerg, I., Knijnenburg, B. P., & Daly, E. (2021). Why or why not? The effect of justification styles on chatbot recommendations. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 39(4), 1-21.
- Wright, T. J., Agrawal, R., Samuel, S., Wang, Y., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2018). Effective cues for accelerating young drivers' time to transfer control following a period of conditional automation. *Accident Analysis & Prevention*, 116, 14-20.
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Prediction of mental workload in single and multiple tasks environments. *International journal of cognitive ergonomics*, 4(3), 213-242.

- Xu, Z., Zhang, K., Min, H., Wang, Z., Zhao, X., & Liu, P. (2018). What drives people to accept automated vehicles ? Findings from a field experiment. *Transportation research part C: emerging technologies*, 95, 320-334.
- Yoon, S. H., & Ji, Y. G. (2019). Non-driving-related tasks, workload, and takeover performance in highly automated driving contexts. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 60, 620-631. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.11.015>
- 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>

4. Les points clés sur le chapitre 1

- Cette étude, basée sur la méthodologie d'Anderson et la théorie de l'intégration de l'information, vise à évaluer la difficulté perçue de la reprise de la conduite manuelle, en fonction de facteurs situationnels et relatifs à la tâche annexe identifiés comme majeurs.
- Le second objectif est d'identifier des profils de conducteurs en fonction de leur perception de la difficulté de la reprise et de l'impact des facteurs manipulés sur leur perception.
- 235 participants ont évalué en ligne dans quelle mesure il était facile de reprendre la conduite manuelle sur une échelle à 20 points, pour chacun des 32 scénarios élaborés en fonction de nos 5 facteurs.
- Trois profils de conducteurs ont été identifiés (réticent, adaptatif et confiant), chacun étant différemment impacté par les facteurs manipulés.
- Plus de la moitié des individus (profils « réticent » et « confiant ») ont une perception inadéquate de la difficulté de reprise, pouvant les mener à une non-utilisation ou une utilisation inadaptée et à risque, ce qui souligne l'importance de développer des solutions pour prévenir les risques émergents des véhicules automatisés.

Chapitre 2

Comment les drivengers se préparent-ils à reprendre le volant ?

Effet du niveau d'expertise routière sur leur comportement visuo-attentionnel.

Ouddiz, S., Paubel, P.-V., & Lemercier, C.. How do novice and expert drivers prepare for takeover when they are drivengers of a level 3 automated vehicle? Investigation of their visual behaviour. Le travail humain, 83(4), 361-378.

1. Introduction au chapitre

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'impact du niveau d'expertise routière sur le comportement visuo-attentionnel des drivengers. Cette étude a fait l'objet d'un article publié dans la revue Le Travail Humain en 2020. La première étude menée a permis de mettre en évidence que la moitié des individus ont une perception inadéquate de la reprise, percevant cette tâche comme trop facile ou trop difficile. Bien que les individus du profil « confiants » percevaient l'impact des facteurs situationnels et relatifs à la tâche, ils percevaient la reprise comme une tâche très facile, même dans les conditions les plus complexes (i.e., reprendre le volant après 30 minutes de trajet automatisé, dans une situation routière à trafic dense, tout en écoutant de la musique, discutant avec un passager et jouant à un jeu sur la tablette. Au contraire, les individus du profil « réticents » percevaient la reprise comme une tâche très difficile, sans que leur perception ne soit impactée par la présence des facteurs étudiés. Ces perceptions inadéquates de la reprise pourraient amener les drivengers à une mauvaise acceptation ainsi qu'à des comportements risqués en situation réelle de conduite automatisée.

Les trois études suivantes s'inscrivent ainsi dans une perspective de prévention des risques émergents de cette technologie, de par une meilleure compréhension de cette activité nouvelle pour l'humain ainsi que par l'évaluation des facteurs pouvant accroître les risques l'impacter en situation écologique. Dans cette deuxième étude, nous nous sommes intéressés au comportement visuo-attentionnel des drivengers durant la période de préparation à la reprise. L'objectif était ici de mieux comprendre ce qu'il se passait avant la reprise effective d'un point de vue attentionnel afin de mieux comprendre les performances dégradées observées lors de la reprise. Nous nous sommes également intéressés au niveau d'expertise routière, facteur très étudié en conduite non-automatisé mais très peu étudié jusqu'à présent dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3 (Wright et al., 2016 ; Samuel et al., 2016). L'étude de ce facteur interne à l'individu apparaît pourtant primordiale dans la mesure où les drivengers de demain n'atteindront peut-être jamais un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires au volant. Ainsi, la présente étude investiguait comment les drivengers se préparaient à reprendre la conduite en fonction de leur niveau d'expertise routière, en évaluant leur comportement visuel indicateur de leur engagement au sein des deux tâches menées durant la période de préparation à la reprise : la tâche annexe ou NDRT et la tâche de conduite.

2. Résumé de l'étude

2.1. Introduction

Les véhicules de demain seront capables de conduire en mode automatisé la plupart du temps, permettant aux drivengers d'un véhicule autonome de niveau 3 de faire ce qu'ils souhaitent jusqu'à l'occurrence d'une inopérabilité du système. Ceci implique pour les

drivengers (i.e., contraction de conducteur et passager, faisant référence aux utilisateurs des véhicules automatisés de niveau 3) de se désengager de la tâche annexe menée durant le mode automatisé afin de s'engager dans la tâche de conduite, au sein d'un intervalle de temps limité. Les études ont jusqu'ici permis de révéler les capacités restreintes des drivengers à reprendre la conduite après un mode automatisé, en particulier lorsqu'ils ont un faible niveau d'expertise routière (Wright et al., 2016 ; Samuel et al., 2016). Cependant, les recherches divergent en ce qui concerne les causes des comportements dégradés lors de la reprise et l'impact des facteurs sur ces performances, bien qu'elles s'accordent sur un problème attentionnel des drivengers. L'intérêt d'évaluer le comportement des drivengers en amont de la reprise effective apparaît particulièrement pertinent afin de mieux comprendre leurs comportements lors de la reprise effective de la conduite. Il s'avère également que peu de recherches centrent leur attention sur l'effet de l'expertise routière et pourquoi les novices expérimentent davantage de difficultés que les experts à reprendre la conduite après un trajet automatisé. Dans la mesure où l'automatisation de la conduite pourrait s'accompagner d'une diminution de l'expertise routière des usagers et des compétences associées, il apparaît crucial d'investiguer dès à présent comment les novices se préparent à reprendre la conduite et pourquoi cette catégorie de conducteurs est la plus vulnérable lors de la reprise en main d'un véhicule automatisé. L'objectif de cette deuxième étude est ainsi d'investiguer comment les drivengers se préparent à la reprise de la conduite en fonction de leur niveau d'expertise routière, en évaluant leur comportement visuo-attentionnel et en le comparant à celui de conducteurs en conduite manuelle. Nous supposons que les drivengers ont un comportement visuo-attentionnel altéré en comparaison aux conducteurs, en particulier lorsqu'ils sont novices.

2.2. Méthode

54 participants, novices ou experts, ont été inclus dans les analyses. Tous les participants étaient âgés de moins de 35 ans et avaient le permis B de conduire. Les participants étaient administrés à l'une des deux conditions : drivengers en conduite automatisée de niveau 3 ou conducteur en conduite manuelle. Les drivengers en conduite automatisée de niveau 3 ($n = 25$) ont été invités à regarder un film durant une phase de conduite autonome de 30 minutes. Ils devaient ensuite se préparer à reprendre la conduite durant les 18 secondes d'alerte à la reprise. La situation routière était peu complexe (i.e., faible densité du trafic, ligne droite, route départementale limitée à 90 km/h) Les conducteurs ($n = 29$) ont effectué le même trajet en conduite manuelle, sans tâche annexe. L'attention allouée par les drivengers à la reprise de la conduite versus à la poursuite de la tâche annexe était investiguée par l'enregistrement de leur comportement oculaire entre le début de l'alerte à la reprise et la désactivation effective du système autonome. Le diamètre pupillaire était enregistré en tant qu'indicateur de leur charge mentale. Les données oculométriques étaient comparées avec celles recueillies chez les conducteurs en condition non-autonome (i.e., dwell time ou temps de fixations, nombre de fixations et temps moyen de fixations sur la tablette pour la tâche annexe vs sur les zones relatives à la tâche de conduite).

2.3. Résultats et discussion

Les résultats ont montré un comportement visuel détérioré chez les drivengers par rapport aux conducteurs (i.e., moins de fixations et fixation plus courtes chez les drivengers en ce qui concerne les zones relatives à la tâche de conduite). Les résultats montraient également que les novices ont un comportement visuo-attentionnel particulièrement dégradé lorsqu'ils sont drivengers (i.e., dwell time plus faible sur les zones relatives à la tâche de conduite), en

comparaison aux conducteurs novices et experts et aux drivengers novices. Finalement, la charge mentale des drivengers était tendancielle plus élevée que celle des conducteurs. Les résultats de cette deuxième étude suggèrent que les drivengers ne disposent pas de capacités attentionnelles suffisantes leur permettant de faire face aux exigences élevées imposées par la reprise de la conduite, particulièrement lorsque leur niveau d'expertise routière est faible.

3. Article 2: How do novice and expert drivers prepare for takeover when they are drivengers of a level 3 autonomous vehicle? Investigation of their visual behaviour

RESUME

Les véhicules de demain seront capables de conduire en mode autonome la plupart du temps, permettant aux Conducteurs-Passagers (CP) d'un véhicule autonome de niveau 3 de faire ce qu'ils souhaitent jusqu'à l'occurrence d'une inopérabilité du système. Ceci implique pour les CP de se désengager de la tâche annexe menée durant le mode autonome afin de s'engager dans la tâche de conduite, au sein d'un intervalle de temps limité. Les études ont jusqu'ici permis de révéler les capacités restreintes des CP à reprendre la conduite après un mode autonome. Par ailleurs, il est attendu que l'autonomisation de la conduite s'accompagnera d'une diminution de l'expertise routière des usagers et des compétences associées. L'objectif de cette étude est d'investiguer comment les CP se préparent à la reprise de la conduite en fonction de leur niveau d'expertise routière. Les CP en conduite autonome de niveau 3 ($n = 25$) ont été invités à regarder un film durant une phase de conduite autonome de 30 minutes. Ils devaient ensuite se préparer à reprendre la conduite durant les 18 secondes d'alerte à la reprise. Les conducteurs ($n = 29$) ont effectué le même trajet en conduite manuelle, sans tâche annexe. L'attention allouée par les

CP à la reprise de la conduite versus à la poursuite de la tâche annexe était investiguée par l'enregistrement de leur comportement visuel entre le début de l'alerte à la reprise et la désactivation effective du système autonome. Le diamètre pupillaire était enregistré en tant qu'indicateur de leur charge mentale. Les données oculométriques étaient comparées avec celles recueillies chez les conducteurs en condition non-autonome. Les résultats ont montré un comportement visuel détérioré chez les CP par rapport aux conducteurs. Les CP novices avaient le comportement visuel le plus dégradé durant cette période de préparation à la reprise. Finalement, la charge mentale des CP était tendanciellement plus élevée que celle des conducteurs. Les résultats suggèrent que les CP ne disposent pas de capacités attentionnelles suffisantes leur permettant de faire face aux exigences élevées imposées par la reprise de la conduite, particulièrement lorsque leur niveau d'expertise routière est faible.

MOTS-CLES : conduite autonome, reprise de la conduite, expertise, attention, charge mentale, oculométrie.

SUMMARY

In the very near future, cars will be in autonomous mode most of the time, allowing *drivengers* (i.e., users of Level 3 automated vehicles) to do what they want until a system inoperability. This implies for the drivenger to disengage from a NDRT (Non-Driving-Related Task) to engage in the driving task within a limited time interval. This takeover period has given rise to a great deal of concern, as studies have highlighted a lack of ability to safely resume the driving activity. In addition, the increase in automation is predicted to be accompanied by a reduction in driving skills and experience. The present study looked at how drivengers prepare for takeover according to their level of driving experience. A group of drivengers ($n = 25$) were told to watch a movie during a 30-minute autonomous driving phase and prepare for takeover during the 18 seconds of a takeover request. A group of drivers ($n = 29$) performed the same drive in manual driving mode without any NDRT. We focused on the amount of attention the drivengers allocated to the resumption of the driving task versus the continuation of the NDRT, by investigating their visual behaviour between the start of the takeover request and the system being deactivated. We also evaluated their mental workload via their pupil size. We compared their eye-tracking data with those of the drivers in the non-autonomous condition. Results indicated poorer visual behaviour among drivengers than among drivers. The novice drivengers' visual behaviour was the most impaired during this critical period. There was also a tendency for drivengers to experience greater mental workload than drivers during the takeover period. These results suggest that drivengers do not have sufficient attentional capacity to cope with the high demand imposed by the takeover, particularly when they are inexperienced.

KEYWORDS: autonomous driving, takeover, driving experience, attention, mental workload, eye-tracking.

1 INTRODUCTION

We still await the advent of a fully autonomous system that will be able to completely manage the driving task (i.e., Level 5 defined by SAE, 2018). The semi-autonomous vehicles of today (i.e., Level 2) and tomorrow (i.e., Level 3) require drivers to resume the driving activity if the system is no longer able to drive safely. Level 2 vehicles (e.g., Tesla Autopilot) can manage both lateral and longitudinal control, but only in specific driving situations (e.g., highway roads), and always with monitoring from the driver. This will also be the case of the Level 3 vehicles, except that *drivengers* (i.e., contraction of *driver* and *passenger*) will not be required to supervise the system, meaning that they will be free to engage in a Non-Driving-Related Task (NDRT) until a system is deactivated.

Increasing vehicle automation means that drivers will not have as much driving practice as they do today. A lack of driving experience has been shown to be one of the main contributing factors of road traffic accidents, with young novice drivers being five times more likely to be involved in crashes and near-crashes than expert drivers (Dingus et al., 2006). Driving experience is acquired through the practice of driving, allowing drivers to acquire essential skills such as hazard perception abilities and a strategic visual behaviours (Brown & Groeger, 1988; Crundall & Underwood, 1998; Underwood et al., 2009). In addition, drivers automatize operational aspects of the driving activity, such as vehicle control (Michon, 1985). The acquisition of skills and automated behaviours allows expert drivers to more attentional resources available by a diminution of their Mental WorkLoad (MWL) and therefore better driving performances than novice drivers (Paxion et al., 2015; Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977; Young & Stanton, 2007). It is easy to expect that the drivers of tomorrow will not acquire the same level of driving experience as the drivers of today (Bainbridge, 1983; Vlakveld, 2015). It is therefore necessary to investigate how novice

drivengers behave in a semi-autonomous vehicle and the extent to which they can safely resume the driving activity.

In addition to the risks arising from the loss of driving experience, the literature suggests that resuming the driving activity after an autonomous driving phase is particularly risky, even for expert drivers. Studies have found that drivengers have degraded behaviours in comparison with drivers, taking longer to react to a critical situation, and having a higher risk of collisions, and poorer vehicle control (Merat et al., 2012; Navarro, 2018; Shen & Neyens, 2017; Strand et al., 2014). There are many reasons why the takeover period is so highly demanding. First, the time pressure of having to adequately assess the system's state and resume the driving task within the few seconds following a takeover request (TOR) can increase drivengers' MWL by increasing both the level of stress and the task demand (Backs & Seljos, 1994; Galy et al., 2012; Inzana et al., 1996; Matthews & Desmond, 1995; Monod & Kapitaniak, 1999). Furthermore, drivengers of a Level 3 autonomous vehicle are given the possibility of engaging in a NDRT while the system is activated. This means that during a takeover period, they have to switch their attention away from the NDRT and back to the driving task, which is known to be highly demanding (i.e., switch cost; Monsell, 2003).

The possibility of continuing the NDRT in a dual-task mode after resumption of the driving task could make the takeover even more demanding (Merat et al., 2012; Recarte & Nunes, 2003). Furthermore, the system is more prone to deactivate in highly complex and potentially hazardous situations, which are known to be highly demanding (Merat et al., 2012; Paxion et al., 2015). The meta-analysis conducted by De Winter et al. (2014) showed that the low demand of the driving task during an autonomous driving phase induces a low MWL or *underload* state in drivengers. The higher the level of system automation, the lower the MWL when the system is activated, as a result of drivengers' low involvement in the driving task.

The Malleable Attentional Resources Theory (MART) developed by Young and Stanton (2002a, 2002b, 2007) appears to be the most relevant model for explaining the poor performances of the drivengers at takeover. According to MART, drivengers' underload state results in an artificial reduction or shrinkage of attentional resources, as a mechanism for adapting attentional capacity to the demand of the task performed. Therefore, when the takeover request occurs, drivengers do not have sufficient attentional resources to cope with the suddenly increased task demand, and require an adaptation period to regain optimal attentional capacity. Takeover is particularly demanding for novice drivers, as they have a higher MWL while driving than expert drivers do (Paxion et al., 2015). For instance, studies have shown that young novice drivers require more time to regain optimal situation awareness after takeover than middle-aged expert drivers, in terms of fixations on a latent hazard (Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016). Nevertheless, it is unclear whether this difference came from the drivengers' age or from their driving experience, as each of these internal factors could increase the risk of an accident in a non-autonomous driving context (Falkmer & Gregersen, 2005; Gershon et al., 2019; McGwin & Brown, 1999).

The present study aimed to investigate how drivengers behave in a Level 3 autonomous vehicle according to their level of driving experience by evaluate their visual behaviour. In fact, the visual behaviour of drivers is widely studied as an indicator of their attention invested in the driving task and particularly the visual exploration of the road environment since driving is a predominantly visual activity (Huestegge et al., 2010; Lee, 2008; Sivak, 1996). For example, a distracted driver will have degraded visual behaviour, which will contribute to an increased risk of accidents (Klauer et al., 2006; Lestina & Miller, 1994; Victor et al., 2005). It has also been shown that there is a link between the poor strategic visual behaviour of novice drivers and their poor performance (Crundall & Underwood, 1998 ; Mourant & Rockwell, 1970, 1972). We investigated here how drivengers prepared themselves for takeover, by assessing their

visual behaviour as an indicator of the attention they allocated to the resumption of the driving task and to the NDRT. We also recorded their pupil size, as an indicator of their MWL level (Beatty, 1982; Hess & Polt, 1964; Kahneman, 1973). The data we collected were compared with those of drivers in the non-autonomous driving condition (i.e., control group), to assess the extent to which drivengers' attention and MWL differed from those of drivers according to their level of driving experience. The participants were young novice or expert drivers. To control for age, we only selected participants under 35 years. They were immersed in a driving simulator for about 30 minutes, either in a semi-autonomous driving condition, during which they engaged in a NDRT (i.e., watching a movie), or in a non-autonomous driving condition with no NDRT. The TOR took the form of an audio alert that started 18 seconds before the system was deactivated, in a driving situation considered as low complex (i.e., straight road with a 90 km/hr speed limit and no other road users; Paxion et al., 2015). Data were recorded from the beginning of the TOR to the actual takeover for the drivengers, and during the corresponding period for the drivers. We assumed that the drivengers would exhibit a more degraded visual behaviour than the drivers, as a result of having fewer attentional resources available. We also predicted that they would experience a higher MWL than the drivers, reflecting the high demand imposed by the takeover. Concerning the level of driving experience, we predicted that novices would exhibit particularly degraded visual behaviour when they were drivengers of a Level 3 autonomous vehicle. Although novice drivers were expected to have a higher MWL than expert drivers, we assumed that they would have a comparable MWL level in the semi-autonomous driving condition, as a result of the reduction in their attentional resources and their inability to rapidly adapt their MWL to the high demands of the takeover.

2 METHOD

2.1 PARTICIPANTS

Participants were 65 novice (i.e., less than 1 year of driving experience) or expert (i.e., more than 5 years of driving experience, minimum driving frequency of 3 times per week) drivers. Participants aged under 35 years old were recruited via Facebook groups of Toulouse students. Finally, four participants were excluded because they reported disliking the movie shown on board (i.e., rating below 3 on a scale of 1-6), and seven because of a problem with the recording of the eye-tracking data (i.e., 54 participants included). Participants were randomly assigned to either a non-autonomous or a semi-autonomous driving condition (see Table 1 below for a description of the final sample).

Table 1. Descriptive statistics of participants included in the analyses.

Tableau 1. Statistiques descriptives des participants inclus aux analyses.

	Semi-autonomous driving condition		Non-autonomous driving condition	
	Novice	Expert	Novice	Expert
Age in years	20.33	25.18	21.08	24.92
<i>M (SD)</i>	(3.92)	(3.81)	(1.33)	(3.49)
Number of women	10	5	7	9
Number of men	3	7	5	8
Total number	13	12	12	17

2.2 MATERIAL

2.2.1 *Driving task*

The OKTAL driving simulator is a Peugeot 207 with automatic transmission featuring Scanner software (see Figure 1). It is located at the University of Toulouse 2 Jean-Jaurès. This fixed simulator is composed of three front and two rear displays, allowing 360° immersion in the simulated road environment. Two circuits were designed for this study. The first, 15.7 km long, was a training circuit to familiarize participants with driving in the simulator. It consisted of the straight lines, curves and intersections that would be encountered on the experimental circuit. The latter was 33 km long, with an estimated duration of 32.3 minutes. It included sections of road limited to 50 or 90 km/hr, and various driving situations involving other vehicles. The experimental circuit was followed in autonomous mode for about 32 minutes. The TOR occurred in a low demanding driving situation (i.e., neither complex nor critical: straight line limited to 90 km/hr and no other road users), 18 seconds before the system was deactivated (i.e., time deemed sufficient for safe takeover; Wright et al., 2016). The TOR consisted of the following voice message (i.e., non-artificial female voice): "Warning, you are going to resume driving in 10 seconds, [5 seconds silence], 5 seconds, 4 seconds, 3 seconds, 2 seconds, 1 second, resume driving". The autonomous driving phase was set up in such a way as to respect the French Highway Code. The simulation ended when the system was deactivated. The participants in the non-autonomous driving condition performed the same circuit in manual driving mode.



Figure 1. The OKTAL driving simulator on the SIMUL’AUTO platform, at Toulouse 2 Jean-Jaurès University.

Figure 1. Le simulateur de conduite OKTAL situé à la plateforme SIMUL’AUTO de l’Université Toulouse 2 Jean-Jaurès.

2.2.2 Non-Driving-Related Activity

The NDRT selected for the experiment was watching a movie, as this has been shown to be one of the preferred NDRTs, and planned to be the more practiced in autonomous driving context (Kim et al., 2015). Two comedies (i.e., *Alibi.com* and *Adopte un veuf*) were preselected for the experiment, on the basis of their novelty and their positive appreciation, in order to ensure that participants fully engaged in the NDRT (O’Brien, 2010; O’Brien & Toms, 2008).

Their novelty for participants was checked in three steps: the recent release date of the film (i.e., less than 1 year before), participants' answers to a pre-experimental questionnaire (i.e., selection of the films already viewed from a list of eight films, including the two preselected films and six distractors) and their answers to a post-experimental questionnaire confirming the novelty of the film viewed (i.e., “Had you already seen the movie shown during the autonomous driving phase?”). For the positive appreciation, we checked that all the preselected films scored above 4 out of 5 on the *Allociné.fr* website. The participants' personal liking of the film selected for the drive on the basis of its novelty was confirmed by the post-experimental questionnaire: “On a scale of 1 (*Not at all*) to 6 (*Extremely*), how much did you like the film shown to you during the autonomous driving phase?”. *Alibi.com* was ranked top in the final selection. However, *Adopte un veuf* was selected if *Alibi.com* had already been seen by the participant. None of the participants reported seeing both films. The first 30 minutes of the selected movie were shown during the autonomous drive, on a tablet in the center of the dashboard. The volume was adjusted so that the film was comfortable to listen to, but the participant could still hear the TOR. As pupil diameter varies according to light, the light intensity of the films was measured with a luxmeter. Analyses were considered valid, as each film varied by the same amount (6-20 lux).

2.2.3 Eye-tracking data

Participants' visual behaviour and pupil diameter were recorded with SMI eye-tracking glasses. We considered fixations on two Areas Of Interest (AOIs): the driving scene (i.e., fixations through the windscreen and the front lateral windows) and the tablet. The driving scene AOI corresponded to the driving task for the drivers, and its resumption for the drivengers, while the tablet AOI corresponded to the continuation of the NDRT for the drivengers. We only recorded fixations that lasted at least 80 ms, based on the general

assumption that visual elements fixated beyond this duration would be processed by participants.

The amount of attention devoted to the driving task and its resumption versus the continuation of the NDRT was evaluated on the basis of three eye-tracking parameters: dwell time, number of fixations, and mean fixation duration. *Dwell time* corresponds to the total fixation time (in seconds) allocated to an AOI. As it takes into account both the number of fixations and the mean fixation duration (i.e., these two parameters are multiplied), dwell time is regarded as the most general and stable indicator of the amount of visual attention allocated in a given activity

The number of fixations and mean fixation duration enabled us to investigate more precisely how drivers' and drivengers' visual attention differed according to their level of driving experience. For example, a longer fixation (in seconds) could be associated with deeper or more difficult processing of the information gathered (Goldberg & Kotval, 1998). Then again, a higher number of fixations could be associated with the increasing complexity of the driving environment and, therefore, with the amount of information gathered (Crundall & Underwood, 1998). Finally, MWL, or the amount of attentional resources used by individuals to meet the task demands, was assessed according to mean pupil size during fixations on the driving scene AOI, measured in pixels (i.e., larger pupil size indicates greater MWL; Beatty, 1982; Hess & Polt, 1964; Kahneman, 1973).

2.3 PROCEDURE

All participants completed the pre-experimental questionnaire, which was sent to them at least 3 days before the simulated driving experience. On the basis of their answers, a film was selected for each participant who had been randomly assigned to the semi-autonomous driving condition. The experimental driving session took place on the SIMUL'AUTO platform of

Toulouse 2 Jean-Jaurès University. It began with an explanation of the experiment and the completion of the consent form. A familiarization phase was then carried out in the presence of the experimenter, until participants felt comfortable driving in the simulator (i.e., about 15 minutes). Instructions for the experimental driving phase were given orally (i.e., for all participants: application of the French Highway Code and the need to follow signposts to Toulouse; for those in semi-autonomous driving condition: need to resume the driving task after the TOR and the possibility of watching a movie during the autonomous driving phase). All the participants performed the experimental phase without the presence of the experimenter, after being equipped with the calibrated eye-tracking glasses. The experimental driving phase ended immediately after the actual takeover (i.e., for drivengers) or at its corresponding location in the drive (i.e., for drivers). Finally, the post-experimental questionnaire was administered, and participants were then thoroughly debriefed and thanked for their participation.

2.4 STATISTICAL ANALYSES

First, we ran a 2 x 2 analysis of variance (ANOVA) for each type of eye-tracking data, with driving condition (i.e., non-autonomous driving vs. semi-autonomous driving) and driving experience (i.e., novice vs. expert) as between-participants factors. To compare the visual behaviour and MWL of drivers and drivengers at takeover, we only considered fixations on the driving scene AOI during the last 18 seconds (i.e., after the start of the TOR). We then ran a 2 x 2 mixed ANOVA on each type of eye-tracking data (i.e., except for mean pupil size), with AOI (i.e., driving scene vs. tablet) as a within-subject factor and driving experience as a between-subject factor. These analyses were only conducted for drivengers, in order to evaluate their attention allocated to the resumption of the driving task versus the continuation of the NDRT. The significance threshold was set at $p = 0.05$, although we also report marginally significant results (i.e., $p \leq 0.09$). ANOVAs were computed using partial eta-squared, and were followed by Tukey post hoc tests. For all tests, the assumptions were validated.

3 RESULTS

3.1 COMPARATIVE ANALYSES OF DRIVERS' AND DRIVENGERS' VISUAL BEHAVIOUR AND MENTAL WORKLOAD

The ANOVA conducted on dwell time indicated that drivers spent more time scanning the driving scene ($M = 13.68$, $SD = 2.85$) than drivengers did ($M = 9.03$, $SD = 4$), $F(1, 50) = 29.3$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.37$. The interaction effect between driving condition and driving experience (see Figure 2 below), $F(1, 50) = 4.49$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.08$, revealed that expert drivengers had longer dwell time than novice ones, $p < 0.05$, while no significant difference was observed between expert drivers and novice ones. Furthermore, post hoc tests showed that dwell time on the driving scene was higher for novice drivers than for novice drivengers, $p < 0.001$, whereas between expert drivengers and drivers, this difference was only marginally significant, $p = 0.09$. Finally, a marginally significant effect of driving experience was observed, $F(1, 50) = 3.16$, $p = 0.08$, $\eta^2 = 0.06$, indicating a tendency for experts to have longer dwell time ($M = 11.76$, $SD = 3.6$) than novices ($M = 10.53$, $SD = 4.79$).

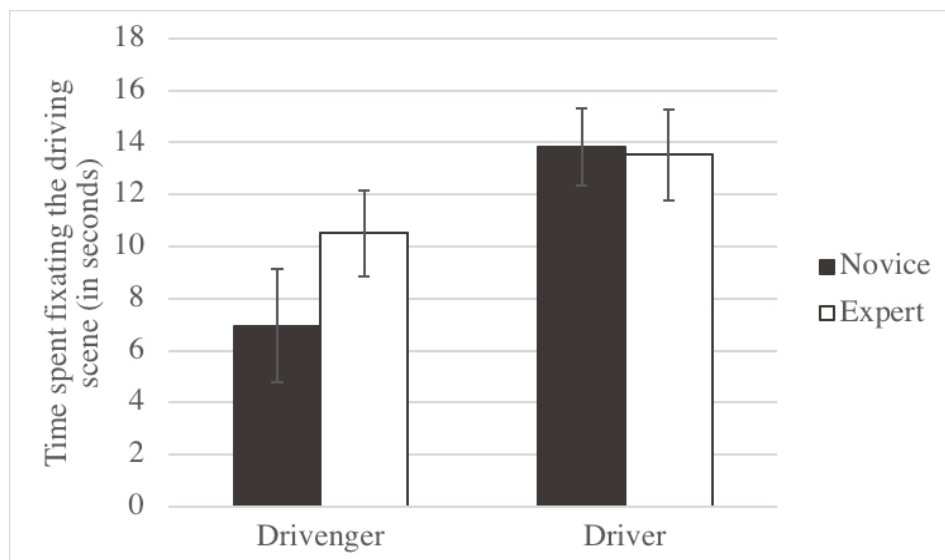


Figure 2. Dwell time for the driving scene (in seconds), according to driving condition and level of driving experience.

Figure 2. Dwell time ou temps passé à fixer la scène routière (en secondes), en fonction de la condition de conduite et du niveau d'expertise routière.

Analyses indicated that drivers made more fixations on the driving scene ($M = 34.16$, $SD = 8.83$) than drivengers did ($M = 28.45$, $SD = 11.38$), $F(1, 50) = 6.55$, $p = 0.01$, $\eta^2 = 0.12$. There was a main effect of driving experience, $F(1, 50) = 7.13$, $p = 0.01$, $\eta^2 = 0.12$, with experts making more fixations ($M = 34.14$, $SD = 9.39$) than novices ($M = 27.56$, $SD = 10.97$). The interaction effect between these variables was not significant here.

The ANOVA on mean fixation durations only indicated a main effect of driving condition, $F(1, 50) = 7.46$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.13$, with drivers making longer fixations on the driving scene ($M = 0.43$, $SD = 0.17$) than drivengers did ($M = 0.32$, $SD = 0.12$).

Finally, analyses of mean pupil size indicated a marginally significant effect of driving condition, $F(1, 50) = 3.32$, $p = 0.07$, $\eta^2 = 0.06$, with drivengers having a larger mean pupil size ($M = 84.48$, $SD = 19.1$) than drivers ($M = 76.24$, $SD = 17$).

3.2 ANALYSES OF DRIVENGERS' VISUAL BEHAVIOUR DURING THE TAKEOVER PERIOD

The ANOVA conducted on dwell time indicated that more time was spent fixating the driving scene ($M = 9.03$, $SD = 4$) than the tablet ($M = 2.93$, $SD = 2.89$), $F(1, 27) = 26.85$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.5$. The interaction effect between AOI and driving experience (see Table 2 below), $F(1, 27) = 6.79$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.2$, indicated a longer dwell time on the driving scene for expert drivengers than for novice drivengers, $p < 0.05$, whereas no difference was found for the tablet AOI, *ns*. Furthermore, expert drivengers fixated the driving scene AOI for longer than the tablet AOI, $p < 0.001$, whereas novice drivengers spent comparable dwell time on the driving scene and tablet AOIs, *ns*. Analyses did not reveal a main effect of driving experience, *ns*.

Analyses also indicated that more fixations were allocated to the driving scene AOI ($M = 28.45$, $SD = 11.38$) than to the tablet AOI ($M = 8.21$, $SD = 7.46$), $F(1, 27) = 46.24$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.63$. The interaction effect between AOI and driving experience (see Table 2 below), $F(1, 27) = 11.33$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.3$, revealed that expert drivengers allocated more fixations to the driving scene than novice drivengers did, $p < 0.01$, but no difference was found concerning fixations on the tablet AOI, *ns*. In addition, expert drivengers allocated more fixations to the driving scene than to the tablet AOI, $p < 0.001$, whereas no difference was found for novice drivengers. The main effect of driving experience was not significant.

Finally, analyses showed that experts made longer fixations ($M = 0.39$, $SD = 0.14$) than novice drivengers ($M = 0.29$, $SD = 0.06$), $F(1, 27) = 4.8$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.15$. The interaction effect (see Table 2 below), $F(1, 27) = 4.82$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.15$, indicated that experts made longer fixations on the tablet AOI than novice drivengers, $p < 0.05$, but there was no difference for the driving scene AOI, *ns*. Post hoc tests also indicated a tendency for expert drivengers to make longer fixations on the tablet than on the driving scene AOI, $p = 0.07$ (i.e., *ns* for the novice group). There was no main effect of AOI, *ns*.

Table 2. Descriptive statistics of the interaction effect between AOI and driving experience for dwell time (in seconds), number of fixations, and mean fixation duration (in seconds).

Tableau 2. Statistiques descriptives de l'effet d'interaction entre l'AOI et le niveau d'expertise routière pour le dwell time (en secondes), le nombre de fixations et la durée moyenne de fixation (en secondes).

Dwell time (s)	Number of fixations	Mean fixation duration
----------------	---------------------	------------------------

	<i>M</i> (<i>SD</i>)		<i>M</i> (<i>SD</i>)		<i>M</i> (<i>SD</i>)	
	Driving scene	Tablet	Driving scene	Tablet	Driving scene	Tablet
Novice	6.94 (3.86)	4.15 (3.76)	21.92 (9.77)	12.5 (8.93)	0.31 (0.13)	0.28 (0.09)
Expert	10.51 (3.49)	2.07 (1.72)	33.06 (10.32)	5.18 (4.36)	0.33 (0.12)	0.45 (0.2)

4 DISCUSSION

With the increase in vehicle automation, the drivengers of tomorrow may not acquire the same level of driving experience and related skills as the drivers of today (Bainbridge, 1983; Vlakveld, 2015). In addition, studies have shown that drivengers have degraded behaviours when they have to takeover, in comparison with drivers in non-autonomous driving condition (cf. Navarro, 2018, for a review). The objective of the present study was to find out how drivengers prepare themselves for takeover according to their level of driving experience, by evaluating their attention through their visual behaviour, and their MWL through their pupil size. First, we hypothesized that the visual behaviour of drivengers is degraded in comparison with drivers. Our second hypothesis was that drivengers experience higher MWL than drivers, when preparing for takeover. We also hypothesized that novice drivengers have degraded visual behaviour in comparison with novice drivers or expert drivengers. Our fourth

and final hypothesis was that novice drivers experience higher MWL than expert drivers, but novice and expert drivengers experience similar MWL. Results showed that during takeover, drivengers allocated less attention to the driving task than drivers, as shown by their degraded visual behaviour with regard to the driving scene (i.e., dwell time, number of fixations, mean fixation duration). There was a trend toward greater MWL among drivengers (i.e., larger mean pupil size), compared with drivers. Results also highlighted the particularly degraded visual behaviour of novice drivengers, insofar as they devoted less attention to the driving scene than either novice drivers (i.e., dwell time) or expert drivengers (i.e., dwell time, number of fixations). Finally, we did not find any difference between novices and experts on MWL, whatever the driving condition (i.e., non-autonomous or semi-autonomous).

When preparing for takeover, drivengers displayed poorer visual behaviour, as they spent less time scanning the driving scene, allocating fewer and shorter fixations to this AOI than drivers in the non-autonomous driving condition. We had predicted that drivengers would devote fewer attentional resources to the driving task than drivers during the period following the TOR, both in a general way (i.e., shorter dwell time) and in terms of the amount of information gathered (i.e., fewer fixations; Crundall & Underwood, 1998) and processed (i.e., shorter fixations; Goldberg & Kotval, 1998). According to Zeeb et al. (2015), the poor performances observed among drivengers at takeover can be explained by their poorer visual behaviour. Our results also indicated a tendency for drivengers to experience greater MWL than drivers (i.e., larger mean pupil size; Beatty, 1982; Hess & Polt, 1964; Kahneman, 1973). In line with MART (Young & Stanton, 2002a, 2002b, 2007), it seems that the drivengers did not have sufficient attentional resources to cope with the high demand imposed by a takeover, as a result of the reduction in their attentional capacity during the autonomous driving phase. Our results suggest that a takeover interval of 18 seconds is not long enough for drivengers to regain

optimum attentional capacity and therefore similar performances to those of drivers in a non-autonomous condition.

Concerning the effect of driving experience, our results indicated that drivengers' visual behaviour was particularly poor when they were novices (i.e., under 1 year of driving experience). Novice drivengers devoted fewer attentional resources to the resumption of the driving task than expert ones. Compared with the experts, they also had insufficient time to adapt their attentional capacity (which had dwindled during the autonomous drive) to the higher demand imposed by the takeover (Wright et al., 2016; Young & Stanton, 2002a, 2002b). The takeover period appears to be particularly risky for novices, owing to their lack of attentional capacity, as reflected by their impaired visual behaviour. As expert drivengers required fewer attentional resources to manage the takeover, they needed less time than the novices to meet the task demand, meaning that more attentional resources could be devoted to the takeover, and more particularly to the exploration of the driving environment, which is necessary to achieve good situation awareness and drive safely (Underwood et al., 2009).

Previous research had shown that resuming driving activity after Level 3 autonomous driving is particularly risky (see Navarro, 2018, for a review). However, there is not yet any clear explanation for the poorer performances we observed at takeover. Our study suggests that, in line with the MART model, drivengers do not have sufficient attentional resources to meet task demands. In addition, the present study revealed that novices display detrimental behaviours as a result of their lack of attentional resources to cope with the higher demand imposed by takeover. However, regarding MWL, results indicated only a trend toward a significant difference in pupil size between drivers and drivengers. In addition, we failed to find a difference between the pupil sizes of novice and expert drivers, although driving has been widely shown to be more demanding for novices (e.g., Paxion et al., 2015). Pupil size has been shown to be more sensitive to changes in visual demand than in auditory or cognitive demand

(Causse et al., 2010). Further studies are needed to investigate drivengers' MWL using a multidimensional approach, combining both physiological and subjective measures (e.g., Miyake, 2001).

Previous studies had shown a degraded visual behaviours of drivengers monitoring the driving environment during a level 2 automation drive (i.e., less fixations on the near road section during a car-following task and more off-road glances; Gaspar & Carney, 2019; Navarro et al., 2019). Other studies highlighted a decrease of attention allocated to the driving scene with the increase of the automation level and even when drivengers did not engage in a NDRT (Carsten et al., 2012). However, very few studies have so far investigated the visual behaviour of novice and expert drivengers in level 3 autonomous driving during the takeover preparation. Results indicated that the period of transition during the autonomous and manual driving is particularly critical insofar as the drivengers did not regain an optimal visual behaviour on the driving scene, particularly when they are novices. Future studies will need to investigate how novice and expert drivengers behave during the autonomous driving phase and after the effective resumption of the driving task. This will allow us to determine the time needed by drivengers to return to optimum driving behaviours and situation awareness after takeover, according to their level of driving experience. Finally, the data we recorded did not allow us to investigate the drivengers' visual behaviour in greater detail. Further studies will therefore need to focus on drivengers' visual behaviour, considering different parts of the driving scene.

5 CONCLUSION

Even if fully automated driving is predicted to reduce road traffic risks by removing the human factor, our results suggest that new risks are already emerging from partial automation. More specifically, because their attentional capacity shrinks during autonomous driving, drivengers exhibit poorer visual behaviour during takeover. The fact that future drivers (i.e., drivengers)

will have less driving experience than drivers do today (Bainbridge, 1983; Vlakveld, 2015), will further compromise the safe resumption of the driving task, according to our results. Novices do not have sufficient attentional resources to cope with the high demand imposed by takeover, as shown by their particularly poor visual behaviour. It is therefore urgent to investigate how best to prevent the risks associated with increasing vehicle automation, in order to make automation work for humans.

6 REFERENCES

- Backs, R. W., & Seljos, K. A. (1994). Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: The effects of level of difficulty in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology*, 16(1), 57-68.
[https://doi.org/10.1016/0167-8760\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0167-8760(94)90042-6)
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
[https://doi.org/10.1016/0005-1098\(83\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(83)90046-8)
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276-292.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
- Brown, I. D., & Groeger, J. A. (1988). Risk perception and decision taking during the transition between novice and experienced driver status. *Ergonomics*, 31(4), 585-597. <https://doi.org/10.1080/00140138808966701>
- Carsten, O., Lai, F. C. H., Barnard, Y., Jamson, A. H., & Merat, N. (2012). Control task substitution in semiautomated driving: Does it matter what aspects are automated? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 747-761. <https://doi.org/10.1177/0018720812460246>
- Causse, M., Sénard, J.-M., Démonet, J. F., & Pastor, J. (2010). Monitoring cognitive and emotional processes through pupil and cardiac response during dynamic versus logical task. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 35(2), 115-123.
<https://doi.org/10.1007/s10484-009-9115-0>
- Crundall, D. E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41(4), 448-458.

- Crundall, D., Underwood, G., 2011. Visual attention while driving: measures of eye movements used in driving research. In: Porter, B.E. (Ed.), *Handbook of Traffic Psychology*. Academic Press, San Diego, pp. 137–148 (Chapter 11).
- De Winter, J. C. F., Happee, R., Martens, M. H., & Stanton, N. A. (2014). Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 196-217.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.06.016>
- Dingus, T. A., Klauer, S.G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J., and Knippling, R.R., 2006. *The 100-car naturalistic driving study: phase II – results of the 100-car field experiment*, DOT HS 810 593, Washington, DC.
- Falkmer, T., & Gregersen, N. P. (2005). A comparison of eye movement behavior of inexperienced and experienced drivers in real traffic environments: *Optometry and Vision Science*, 82(8), 732-739.
<https://doi.org/10.1097/01.opx.0000175560.45715.5b>
- Galy, E., Cariou, M., & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023>
- Gaspar, J., & Carney, C. (2019). The effect of partial automation on driver attention: A naturalistic driving study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 61(8), 1261-1276.
<https://doi.org/10.1177/0018720819836310>
- Gershon, P., Sita, K. R., Zhu, C., Ehsani, J. P., Klauer, S. G., Dingus, T. A., & Simons-Morton, B. G. (2019). Distracted driving, visual inattention, and crash risk among

- teenage drivers. *American Journal of Preventive Medicine*, 56(4), 494-500.
<https://doi.org/10.1016/j.amepre.2018.11.024>
- Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1998). Eye movement-based evaluation of the computer interface. In Kumar, J. (Ed.), *Advances in Occupational Ergonomics and Safety*, IOS Press, 529-532.
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143(3611), 1190-1192.
<https://doi.org/10.1126/science.143.3611.1190>
- Huestegge, L., Skottke, E.-M., Anders, S., Müsseler, J., & Debus, G. (2010). The development of hazard perception: Dissociation of visual orientation and hazard processing. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2009.09.005>
- Inzana, C. M., Driskell, J. E., Salas, E., & Johnston, J. H. (1996). Effects of preparatory information on enhancing performance under stress. *Journal of Applied Psychology*, 81(4), 429.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Kim, H. S., Yoon, S. H., Kim, M. J., & Ji, Y. G. (2015). Deriving future user experience in autonomous vehicle. In *Proceedings of the AutomotiveUI '15 Adjunct*, Nottingham, United Kingdom (pp. 112–117).
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data*. Blacksburg: Virginia Tech Transportation Institute. (NTIS No. DOT HS 810 594).

- Lee, J. D. (2008). Fifty years of driving safety research. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 521-528.
<https://doi.org/10.1518/001872008X288376>
- Lestina, D. C., & Miller, T. R. (1994). Characteristics of crash-involved younger drivers. In *38th Annual proceedings of the association for the advancement of automotive medicine* (pp. 425–437). Des Plaines: Association for the Advancement of Automotive Medicine.
- Matthews, G., & Desmond, P. A. (1995). Stress as a factor in the design of in-car driving enhancement systems. *Le Travail Humain*, 58(2), 109-129.
- McGwin, Jr, G., & Brown, D. B. (1999). Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 31(3), 181-198.
[https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(98\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(98)00061-X)
- 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>
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: what do we know, what should we do? In L. Evans & R. C. Schwing (Eds.), *Human Behavior and Traffic Safety* (p. 485-524). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Miyake, S. (2001). Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures. *International Journal of Psychophysiology*, 40(3), 233-238.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00191-4)
- Monod, H., Kapitiianiak, B., 1999. *Ergonomie*. Masson, Paris.

- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1970). Mapping eye-movement patterns to the visual scene in driving: An exploratory study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 12(1), 81-87.
<https://doi.org/10.1177/001872087001200112>
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 14(4), 325-335.
<https://doi.org/10.1177/001872087201400405>
- Navarro, J. (2018). A state of science on highly automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 366-396.
<https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1439544>
- Navarro, J., Osiurak, F., Ovigue, M., Charrier, L., & Reynaud, E. (2019). Highly automated driving impact on drivers' gaze behaviors during a car-following task. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(11), 1008-1017.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1561788>
- O'Brien, H. L. (2010). The influence of hedonic and utilitarian motivations on user engagement: The case of online shopping experiences. *Interacting with Computers*, 22(5), 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.001>
- O'Brien, H. L., & Toms, E. G. (2008). What is user engagement? A conceptual framework for defining user engagement with technology. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59(6), 938-955.
<https://doi.org/10.1002/asi.20801>

- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Overload depending on driving experience and situation complexity: Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*, 51, 343-349. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.014>
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(2), 119-137. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.2.119>
- 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: Journal of the Transportation Research Board*, 2602(1), 115-120. <https://doi.org/10.3141/2602-14>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.
- 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>
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127.
- SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee. (2018). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. *SAE International: Warrendale, PA, USA*.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25(9), 1081-1089. <https://doi.org/10.1068/p251081>
- 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>
- Underwood, G., Chapman, P., Crundall, D., 2009. Experience and visual attention in driving. In: Castro, C. (Ed.), *Human Factor of Visual and Cognitive Performance in Driving*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 89–116.
- Victor, T. W., Harbluk, J. L., & Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 167-190.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.04.014>
- Vlavelde, W. Transition of control in highly automated vehicles; *SWOV Institute for Road Safety Research: Leidschendam, The Netherlands*, 2015; R-2015-22.
- 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>
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002a). Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 178-194. <https://doi.org/10.1080/14639220210123789>
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002b). Malleable attentional resources theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(3), 365-375.
<https://doi.org/10.1518/0018720024497709>

- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324-1339. <https://doi.org/10.1080/00140130701318855>
- 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>

4. Les points clés sur le chapitre 2

- Cette deuxième étude menée sur simulateur de conduite a pour objectif d'évaluer comment les drivengers se préparent à reprendre la conduite après un trajet automatisé de niveau 3, en fonction de leur niveau d'expertise routière.
- Les mesures oculométriques de 54 participants ont été utilisées afin d'évaluer leur comportement visuo-attentionnel, c'est à dire leur attention investie au sein de la modalité visuelle de la tâche de conduite et de la tâche annexe de visionnage de film sur tablette.
- Le comportement visuo-attentionnel des drivengers (i.e., conduite automatisée de niveau 3) novices et experts étaient comparés à leurs homologues conducteurs en condition de conduite manuelle, pour la période correspondant à l'alerte à la reprise, allant du début de l'alerte à la désactivation du mode automatisé (i.e., 18 secondes).
- Les résultats indiquent que le comportement visuo-attentionnel des drivengers est dégradé lors de la période de préparation à la reprise en comparaison de celui des conducteurs.
- Les novices ont un comportement visuo-attentionnel particulièrement dégradé lorsqu'ils sont drivengers, suggérant un manque crucial de ressources attentionnelles disponibles chez ces individus.

Chapitre 3

Reprise de la conduite et switch attentionnel :

Vers une explication des performances dégradées chez les novices.

Ouddiz, S., & Lemerrier, C. (soumis le 11/06/2024). How do novice and expert drivers prepare to takeover? Investigation of their visual and task switching behaviour.

1. Introduction au chapitre

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'impact du niveau d'expertise routière sur le comportement de switch attentionnel des drivengers. Cette étude a fait l'objet d'un article soumis dans une revue à comité de lecture le 11 juin 2024. La deuxième étude précédente a permis de mettre en évidence le comportement visuo-attentionnel particulièrement détérioré chez les drivengers, et en particulier chez les novices en comparaison aux conducteurs et aux drivengers experts. Ce comportement visuo-attentionnel altéré pourrait ainsi expliquer les performances détériorées observés lors de la reprise chez les drivengers (Merat et al., 2013) ainsi que chez les novices (Wright et al., 2016). Dans cette troisième étude, nous nous sommes intéressés plus précisément aux comportements de switch attentionnel chez les drivengers, en fonction de leur niveau d'expertise routière. En effet, la reprise est une période de transition entre les modes autonomes et manuel de conduite. Durant le mode automatisé de niveau 3, les drivengers peuvent s'engager au sein d'une NDRT. Ainsi, cette période de transition, c'est-à-dire entre le début de l'alerte à la reprise (i.e., TakeOver Request, TOR) et la reprise effective est une période où le drivenger va devoir switcher entre la NDRT et la tâche de conduite. Il apparaît également possible que durant cette période plus ou moins longue (i.e., ici de 18

secondes), le drivenger va alterner les deux tâches à de multiples reprises. Dans la mesure où le switch attentionnel est coûteux et peut engendrer une détérioration des performances à l'ensemble des tâches (Monsell, 2003), les performances détériorées rapportées dans la littérature à la reprise (Navarro, 2018), en particulier chez les novices (Wright et al., 2016) pourraient être directement liées aux comportements de switch survenant lors de la reprise. Dans cette troisième étude, nous avons ainsi évalué les comportements de switch entre les deux tâches durant cette période de transition, en fonction du niveau d'expertise routière des drivengers.

2. Résumé de l'étude

2.1. Introduction

Avant de parvenir à un niveau d'automatisation total permettant de réduire les accidents et la mortalité routière, les véhicules automatisés d'aujourd'hui (i.e., niveau 3) sont capables de prendre en charge la conduite seulement dans des situations restreintes. Les drivengers peuvent ainsi s'engager dans une tâche annexe ou Non-Driving-Related Task (NDRT) tant que le système est activé. Lorsque l'alerte à la reprise (TOR) survient, les drivengers doivent se désengager de la NDRT menée durant le mode automatisé afin de se réengager au sein de la tâche de conduite, ce qui implique de switcher leur attention entre les deux tâches. Cette reprise est très préoccupante, la littérature s'accordant sur le fait que l'attention des drivengers est altérée lors de la reprise, impliquant une mauvaise conscience de la situation et des risques accrus (Navarro, 2018). Ces performances détériorées pourraient être liées au coût du switch attentionnel requis lors de la transition entre les modes automatisés et manuels de conduite (Monsell, 2003). L'objectif principal de cette troisième étude est d'évaluer l'impact du niveau d'expertise routière sur la fréquence de switch attentionnel entre la NDRT de visionnage de

film sur tablette et la tâche de reprise de la conduite, durant la période de préparation à la reprise. Nous supposons que les novices ont une fréquence de switch plus élevée que les experts, expliquant leur comportement visuo-attentionnel altéré et leurs performances de reprise dégradées.

2.2. Méthode

29 participants novices ou experts étaient immergés dans une simulation de conduite automatisée de 30 minutes au cours de laquelle ils se sont engagés au sein d'une NDRT de visionnage de film sur tablette. La période de TOR ou de transition s'est déroulée 18 secondes avant la reprise effective, dans une situation routière peu complexe. Le comportement oculométrique des drivengers était enregistré durant le mode automatisé et la transition de contrôle, afin d'évaluer l'engagement au sein de la NDRT et de la conduite (i.e., dwell time ou temps de fixation), ainsi que leur switch attentionnel entre ces deux tâches (i.e., nombre d'alternance visuelle entre les deux tâches). Trois types d'analyses ont été réalisées sur le dwell time (tâche de conduite vs NDRT) d'une part, et sur de la fréquence de switch d'autre part. La première analyse intéressait l'évolution de ces mesures entre le début et la fin du mode automatisé. La deuxième concernait la comparaison du mode automatisé et de la période TOR de préparation à la reprise. La période de préparation à la reprise était découpée en 4 sous-périodes afin d'évaluer l'évolution de leur fréquence de switch durant le TOR. Ainsi, la troisième analyse concernait l'évolution, durant le TOR, du dwell time ou temps passé à fixer les zones relatives à la tâche de conduite versus à fixer la tablette (NDRT), ainsi que l'évolution de la fréquence de switch entre ces deux tâches.

2.3. Résultats et discussion

Les résultats montrent que les drivengers sont fortement engagés dans la NDRT (Non-Driving Related Task) et engagés peu d'attention à la tâche de conduite dès que le mode automatisé était activé. Lors de la survenue de l'alerte ou TOR, ils se désengagent progressivement de la NDRT pour se réengager dans la tâche de conduite. Cependant, les drivengers réduisent leur comportement de switch entre tâches seulement 3 secondes avant la reprise effective. Le comportement de switch est deux fois plus important chez les novices que chez les experts durant la période de TOR. Le coût du switch (Castanheira, Loparco & Otto, 2020; Monsell, 1995; Kiesel et al., 2010), en plus de l'engagement persistant dans la NDRT pendant cette période de préparation à la reprise, apporte une explication quant à la dégradation des performances chez les drivengers (e.g., Merat et al., 2012). Ce coût du switch apporte également également une explication quant à l'incapacité des drivengers novices à consacrer autant de ressources que les experts à la modalité visuelle de la tâche de conduite (cf. étude 2) et les performances particulièrement détériorées rapportées dans la littérature lors de la reprise effective (e.g., Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016).

3. Article 3: How do novice and expert drivers prepare to takeover? Investigation of their visual and task switching behaviour

Abstract

Before to achieve a fully automation predicted to increase road safety, drivengers (i.e., contraction of driver and passenger) of the next Level 3 Automated Vehicle (L3 AV) can engage in a Non-Driving-Related Task (NDRT) as long as the system is activated. When the TakeOver Request (TOR) occurs, drivengers need to disengage from the NDRT to resume the driving task, implying to switch their attention between the two tasks. This takeover is a lot of concerns since we know that takeover performance is impaired by an attentional deficit of drivengers, particularly when they have a low driving experience. This attentional deficit could be related to the task switching cost as a result of the alternation between the NDRT and the resumption of driving. The aim of this study was then to investigate novices and expert's engagement (i.e., gaze duration) and task switching (i.e., number of visual gazes switching) between the NDRT and the driving task, during the automated drive and the TOR period. 29 drivers were immersed in a simulated automated drive of 30 minutes during which they engaged in a film watching NDRT. The TOR occurred 18 seconds before the effective takeover. Analyses showed that drivengers reduce their task switching behaviour only 3 seconds before the effective takeover. Novices' task switching behaviour was more important than expert ones. The cost of task switching can explain the impaired novice performance observed in the literature. Results are discussed with respect to models of attention and prevention of emerging risks of L3 VAs.

Keywords: automation, takeover, driving experience, task switching, attention, eye-tracking

1. Introduction

In the 16th century, Leonardo Da Vinci designed a cart capable of moving by itself with the help of springs, on a predetermined trajectory. This event marked the beginning of human interest in vehicle automation. After be focused on aircraft, the interest was widely carried on vehicle automation in the aim to achieve fully autonomous driving. Given that the first cause of road crash currently involves a human error (i.e., attentional deficit), totally removing the driver to the loop of the driving task is predicted to reduce road deaths (Dingus et al., 2006; Singh, 2015; Young & Regan, 2007). Before to achieve such an automation level (i.e., level 4 and 5 on the 6 defined by the Society of Automotive Engineers; SAE, 2021), drivers are required to resume the driving task when the automated system is no longer able to drive safely. This takeover request occurs already in level 2 (e.g., Tesla *Autopilot*) and in the next Level 3 Automated Vehicle (L3 AV). Contrarily to level 2 where the driver needs to supervise the driving task while the system handle both lateral and longitudinal control of the vehicle, the drivenger (i.e., contraction of driver and passenger, Lemercier et al., 2018) will be free to do what's he wants until a TakeOver Request (TOR) informs him that it goes to deactivate in a handful of seconds. Drivenger has then to disengage from the Non-Driving-Related Task (NDRT) potentially conducted during the automated drive to reengage quickly in the driving task.

Partially removing humans to the loop of driving implies new risks for road safety. Studies showed that the takeover is a dangerous period where drivengers have degraded behaviours. For example, studies highlighted a longer reaction time to critical events, an impaired hazard detection, a deteriorated vehicle control and a higher risk of collisions (Merat & Jamson, 2009; Navarro, 2018; Shen & Neyens, 2017; Strand et al., 2014). Two main hypotheses have been proposed to explain the difficulties encountered by drivengers during the takeover process. The first one attributed the poor takeover performances to the out of the loop

effect: in L3 AV, drivengers engaging in a NDRT (e.g., watching a film, playing a game on the tablet) do focus their attention to the driving task, leading them to poor perception, comprehension and projection of the driving situation and impaired performances at the takeover (Endsley, 1988; Gold et al., 2013; Kienle et al., 2009; Merat et al., 2014, 2019; Rudin-Brown & Parker, 2004; Strand et al., 2014b). The second and complementary hypothesis stipulates that the detrimental takeover performances are attributed to a lack of attentional resources available, caused by an underload state during the automated drive and the temporary shrinkage of their pool of attentional resources (Malleable Attentional Resources Theory, MART, Young & Stanton, 2002a, 2002b, 2007). In both cases, drivengers have to disengage from the NDRT to engage in the driving task resumption to regain optimal situation awareness and/or optimal pool of attentional resources. This period of transition implies for the drivenger to switch between the NDRT and the resumption of the driving task.

Alternate between at least two tasks is costly in terms of attentional resources and detrimental for the performances at all the tasks (e.g., increases in error rates and reaction time; Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003; Vandierendonck et al., 2010). This switch cost is the result of the task set reconfiguration, that is “(1) the passive dissipation of the previous task set, (2) the preparation of the new task set, and (3) a residual component” (Meiran et al., 2000, p 211). Conducting two tasks in alternation is therefore an attentional demanding process where the individual has to disengage his attention from one task in order to re-engage it on another and *vice versa* (Trafton & Monk, 2007). In a context of L3 AV, two effects of the switch cost could be expected. First, drivengers would need time to reconfigure the driving task set parameters when the TOR occurs, resulting in a lack of attention at the takeover if they have not enough time to prepare themselves. Second, alternate multiple times between the NDRT and the driving task resumption during the automated drive, the TOR and/or after the takeover would be all the more attentionally demanding, increasing Mental WorkLoad (MWL) and impairing the

takeover performances (da Silva Castanheira et al., 2021; Kiesel et al., 2010; Monsell, 1995). Task switching behaviour could therefore be a complementary explanation of the detrimental performances observed at the takeover.

Task switching behaviour and its associated cost have been shown to vary between individuals. For example, the advance in age increases the cost of task switching (Kray & Lindenberger, 2000; Reimers & Maylor, 2005; Wasylyshyn et al., 2011). Task expertise could also be a factor impacting task switching behaviour. When the individual develops an expertise toward a task, some aspects of the task are automatized, allowing them to allocate less attentional resources and reduce mental workload. The consequence is that experts are better than novices at multitasking, and particularly at dual tasking, that is conducting the experienced task and an additional task simultaneously (Schneider & Shiffrin, 1977; Shiffrin & Schneider, 1977). It seems important to point out that dual-task is actually possible when the tasks are not concurrent in terms of pool of resources mobilized. For example, driving and texting are both visual-motor tasks that cannot be conducted simultaneously but by task switching whereas driving while talking with the passenger (i.e., auditory-vocal task) can be conducted simultaneously if the driver has attentional resources available (Wickens, 2008). Dual task is also possible when the individual has sufficient attentional resources available to introduce a secondary task simultaneously. In the context of driving, novice drivers having not automatized yet the operational level of driving such as vehicle control (Michon, 1985) lead them to particularly impaired driving performances while conducting a NDRT (Paxion et al., 2015). This could be explained by their lack of attentional resources available and the resulting overload state. It could be suggested that novices switch between the driving task and the NDRT instead of dual task as it required more attentional resources available. In the context of L3 AV, it was shown that novices have worst performances than experts when they have to resume the driving task (i.e., longer time needed to regain an optimal situation awareness after the takeover in terms

of gaze toward latent hazard, poorer vehicle control; Chen et al., 2021; Ouddiz et al., 2020; Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016a). Yet, novices have worst performances than experts in a context of manual driving, but their particularly worst takeover performances could be explained by an additional factor: their task switching behaviour during the transition from the manual to the automated mode (i.e., TakeOver Request (TOR) period and its resulting cost.

Focus on novice drivers' behaviours in the context of L3 AV and particularly during the takeover period seem particularly important. Expertise and associated skills being constructed through experience, drivengers of tomorrow might never develop a level of expertise allowing them to drive safely (Bainbridge, 1983; Vlakveld, 2015b). The aim of the present study was to investigate how novice and expert drivers allocate their attention between the NDRT and the driving task during the automated drive and the transition of control or TOR period. We specifically focused on their attention before the effective takeover as it allowed us to better understand why the literature point out detrimental takeover performances (Navarro, 2019). To this aim, we recorded novices and experts' eye-tracking behaviours during 30 minutes of level 3 automated drive and during 18 seconds of TOR (i.e., period being estimated to be the most optimal for takeover; Wright et al., 2016). Time spent to fixate the NDRT and the driving task's areas of interest was used as an indicator of task engagement while number of visual alternations between the NDRT and the driving task's areas was used as an indicator of task switching behaviour. These eye-tracking parameters were compared between the begin and the end of the automated drive, between the end of the automated drive and the TOR and between four sub-periods of the TOR in order to investigate their evolution among drivengers according to their level of driving experience. We first presume a decrease of engagement in the driving task and an increase in the NDRT through the automated drive while the inverse is expected concerning the evolution between the end of the automated drive and the TOR. We also supposed a decrease in NDRT engagement and an increase in driving task engagement between

the end of the automated drive and the TOR period as well as through the four TOR sub-periods. Concerning the level of driving experience, we supposed here that novices are more invest in the NDRT than experts, and more in the NDRT than the driving task, whatever the period analyzed. The first hypothesis about task switching behaviour is a diminution of the number of switches through the automated drive, particularly for novices, as a result of the out-of-the-loop effect (i.e., driving task disengagement). Concerning the comparison of the number of switches between the end of the automated drive and the TOR period, we presumed an augmentation for novices and a diminution for experts (i.e., more switches made by experts than novices during the end of the automated drive and in contrary, more switches made by novices during the TOR). Finally, we presumed a diminution of the number of switches across the four TOR sub-periods for both novices and experts, with more switches made by novices in each sub-period as a reflect of their low-risk awareness and poor strategic visual behaviour.

2. Method

2.1. Participants

Participants aged under 35 years old were recruited via Facebook groups of Toulouse students (cf. Table 1). 36 drivers, including 18 novices (i.e., less than 1 year of driving experience) and 18 experts (i.e., more than 5 years of driving experience, minimum driving frequency of 3 times per week) participated to the experiment. Three participants were excluded because they reported disliking the NDRT (i.e., film rated below 3 on a scale of 1-6), and 4 because of a problem with the recording of the eye-tracking data. Analyses included the data of 29 participants (i.e., 12 novice and 17 expert drivers).

Table 1

Descriptive statistics of participants included in the analyses.

	Novice	Expert
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>
Age in years	20.33 (3.92)	25.18 (3.81)
Number of women	9	8
Number of men	3	9
Total number	12	17

2.2. Material

2.2.1. Driving task

The driving simulator is a Peugeot 207 working with OKTAL Scanner software, located at the University Toulouse II Jean-Jaurès (see Figure 1). This fixed simulator is composed of three front and two rear displays, allowing 360° immersion in the simulated road environment. Two circuits were designed for this study. The first, 15.7 km long, was a training circuit to familiarize participants with driving in the simulator. It consisted of the straight lines, curves and intersections that would be encountered on the experimental circuit. The latter was 33 km long, with an estimated duration of 32.3 minutes. It included sections of road limited to 50 or 90 km/hr, and various driving situations involving other vehicles. The experimental circuit was followed in automated mode for about 32 minutes. The TOR occurred in a low demanding driving situation (i.e., neither complex nor critical: straight line limited to 90 km/hr and no other road users), 18 seconds before the system was deactivated (i.e., time deemed sufficient for safe takeover; Wright et al., 2016). The TOR consisted of the following voice message (i.e., non-artificial female voice): "Warning, you are going to resume driving in 10 seconds, [5 seconds silence], 5 seconds, 4 seconds, 3 seconds, 2 seconds, 1 second, resume driving". The automated

driving phase was set up in such a way as to respect the French Highway Code. The simulation ended when the system was deactivated.



Fig. 1. The OKTAL driving simulator on the SIMUL’AUTO platform, at Toulouse 2 Jean-Jaurès University. *[In color]*

2.2.2. Non-Driving-Related Task (NDRT)

The NDRT consisted of a movie watching. This task has been shown to be one of the preferred NDRTs, and planned to be the more practiced in automated driving context (Kim et al., 2015). Two comedies (i.e., *Alibi.com* and *Adopte un veuf*) were preselected for the experiment, on the basis of their novelty and their positive appreciation, in order to ensure that participants fully engaged in the NDRT (O’Brien, 2010; O’Brien & Toms, 2008). Their novelty for participants was checked in three steps: the recent release date of the film (i.e., less than 1 year before), participants' answers to a pre-experimental questionnaire (i.e., selection of the films already viewed from a list of eight films, including the two preselected films and six distractors) and their answers to a post-experimental questionnaire confirming the novelty of the film viewed (i.e., “Had you already seen the movie shown during the automated driving phase?”). For the

positive appreciation, we checked that all the preselected films scored above 4 out of 5 on the *Allociné.fr* website. The participants' personal liking of the film selected for the drive on the basis of its novelty was confirmed by the post-experimental questionnaire: "On a scale of 1 (*Not at all*) to 6 (*Extremely*), how much did you like the film shown to you during the automated driving phase?". *Alibi.com* was ranked top in the final selection. However, *Adopte un veuf* was selected if *Alibi.com* had already been seen by the participant. None of the participants reported seeing both films. The first 30 minutes of the selected movie were shown during the automated drive, on a tablet in the center of the dashboard. The volume was adjusted so that the film was comfortable to listen to, but the participant could still hear the TOR. As pupil diameter varies according to light, the light intensity of the films was measured with a luxmeter. Analyses were considered valid, as each film varied by the same amount (6-20 lux).

2.2.3. Eye-tracking data

SMI eye-tracking glasses were used to record participants' visual behaviours. We were interested in the fixations made among the driving task Area Of Interests (AOIs, i.e., driving scene, mirrors, gauges) and those made among the NDRT AOI (i.e., tablet). The driving task corresponded to the driving task supervision during the automated drive, its attentional resumption during the TOR and its physical resumption at the effective takeover. The number of switches were calculated considering a visual change between the two areas (i.e., driving task vs NDRT) as one switch. We also were interested in the dwell time, that is the total amount of time spend to make fixation in the NDRT or the driving task AOI.

2.3. Procedure

First, participants completed the pre-experimental questionnaire, which was sent to them at least 3 days before the simulated driving experience. On the basis of their answers, a film

was selected for each participant. After explaining the instructions and completed the consent form, a familiarization phase was carried out in the presence of the experimenter, until participants felt comfortable driving in the simulator (i.e., about 15 minutes). The functioning of the level 3 automated system was then explained to them (i.e., voice alert, countdown to takeover). They were also asked to watch the selected movie while the automated system was operating. They performed the experimental drive without the presence of the experimenter, after being equipped with the calibrated eye-tracking glasses. The experimental driving phase ended immediately after the actual takeover. Finally, the post-experimental questionnaire was administered, and participants were then thoroughly debriefed and thanked for their participation.

2.4. Statistical analyses

Two phases were interested by this study (cf. Figure 2 below). The automated driving phase included two periods: the Period 1 (P1) of 20 seconds occurring 5 minutes after the begin of the automated drive, the P2 of 20 seconds occurring immediately before the TakeOver Request (TOR). The takeover phase occurred after 30 minutes of automated drive and included the P3 (i.e., 18 seconds of TOR and 2 seconds of takeover), subdivided in 4 periods of 5 seconds.

We computed 3 analyses of variance for each eye-tracking parameter (i.e., number of switches and dwell time). The first group of analyses aimed to investigate how the number of switches and the dwell time evolved across the automated drive, that is between the begin (P1) and the end (P2) of the automated drive phase. The second analyses focused on how these parameters evolved between the automated drive and the takeover phase by comparing P2 (i.e., end of the automated drive) and P3 (i.e., takeover phase). Finally, the last analyses interested the evolution of these parameters across the takeover phase, that was subdivided in four periods of 5 seconds, from the beginning to the TOR to 2 seconds after the effective takeover. The

significance threshold was set at $p = 0.05$, although we also report marginally significant results (i.e., $p \leq 0.09$). ANOVAs were computed using partial eta-squared, and were followed by Tukey post hoc tests. For all tests, the assumptions were validated.

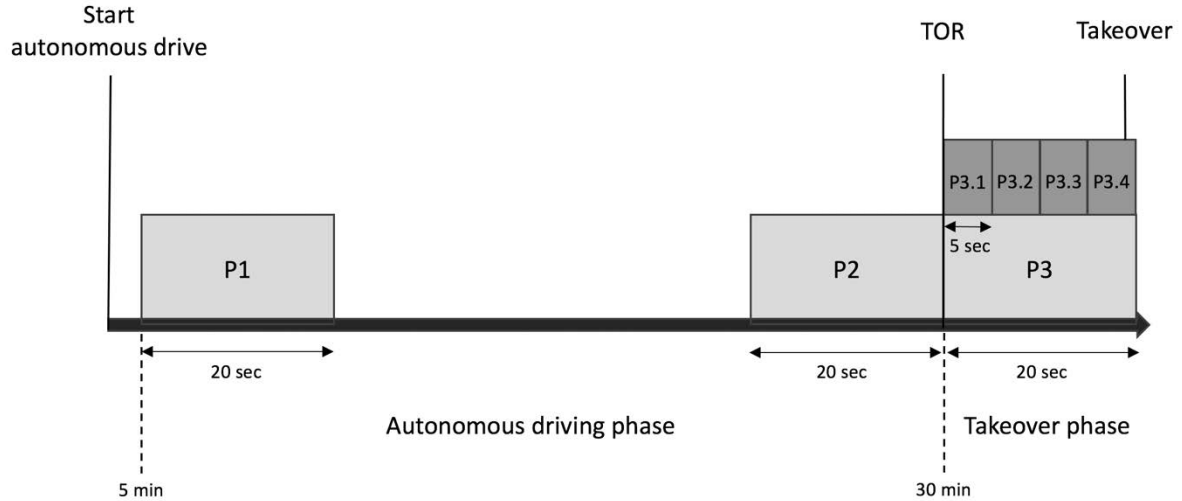


Fig. 2. The phases of the experiment and the periods analyzed. The automated driving phase included two periods analyzed: Period 1 (P1) corresponding to 20 seconds at the begin of the automated drive and P2 to the 20 last seconds of the automated drive. The takeover phase included P3 and four sub-periods from P3.1 (i.e., the beginning of the TOR) to P3.4 (i.e., until 2 seconds after the effective takeover).

3. Results

3.1. Dwell time

3.1.1. Automated driving phase

The ANOVA was conducted on the dwell time (in second), with the period (i.e., begin vs end of the automated mode) and the task (i.e., NDRT vs driving) as within-subject factor and the level of driving experience (i.e., novice vs expert) as between-subject factor. The results only indicated a main effect of the task, $F(1, 27) = 96.98, p < 0.001, \eta^2 = 0.78$, drivengers spent more

time fixating the NDRT ($M = 6.52$, $SD = 2.28$) than the driving task ($M = 0.94$, $SD = 1.48$) during the automated mode.

3.1.2. Automated driving vs takeover phase

The ANOVA conducted on the dwell time (in second), with the period (i.e., automated mode vs takeover) and the AOI (i.e., NDRT vs driving) as within-subject factor and the level of driving expertise (i.e., novice vs expert) as between-subject factor was computed with the winsorizing method (Field, 2009) consisting to replace the outlier by the maximum value that is not an outlier.

First, the analyses revealed a main effect of the period $F(1, 27) = 19.84$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.42$, indicating a decrease in the dwell time between P2 ($M = 7.76$, $SD = 2.47$) and P3 ($M = 6.64$, $SD = 2.72$). Drivengers also devoted more time to the NDRT ($M = 8.32$, $SD = 2.63$) than to the driving task ($M = 6.07$, $SD = 2.56$), $F(1, 27) = 17.63$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.40$. Finally, analyses indicated an interaction effect between the period and the task, $F(1, 27) = 241.73$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.90$. Tukey's post hoc tests showed a decrease of the dwell time on the NDRT between the automated drive ($M = 14.11$, $SD = 3.34$) and the takeover period ($M = 2.54$, $SD = 1.92$) as well as an increase of the dwell time on the driving task between the automated drive ($M = 1.41$, $SD = 1.59$) and the takeover period ($M = 10.74$, $SD = 3.52$). Drivengers spent more time to fixate the NDRT areas than the driving task areas during the automated drive while the opposite was found during the TOR period, both $p < 0.001$. The ANOVA did not reveal other significant effect.

3.1.3. Takeover phase

Analyses indicated a main effect of the task, drivengers spent more time engaging in the driving task ($M = 2.68$, $SD = 1.10$) than in the NDRT ($M = 0.73$, $SD = 0.93$), $F(1, 27) = 48.6$, $p < 0.001$,

$\eta^2 = 0.64$. The interaction effect between the task and the driving experience, $F(1, 27) = 5.33$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.16$, with Tukey's post-hoc test only showed a marginally significant difference between novice ($M = 2.27$, $SD = 1.19$) and expert ($M = 2.97$, $SD = 0.94$) concerning the dwell time on the driving task, $p = 0.084$, while no significant difference was found between novice ($M = 1.04$, $SD = 1.14$) and expert ($M = 0.52$, $SD = 0.65$) concerning the NDRT, *ns*. Finally, the interaction effect between the task and the period (cf. Fig. 2 below), $F(3, 81) = 12.92$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.32$, indicated with Tukey's post-hoc tests that drivengers increase their time spent to fixate the driving task areas between P3.1 and P3.4, $p < 0.001$, with marginally significant differences between P3.1 and P3.3, $p = 0.083$ as well as between P3.2 and P3.4, $p = 0.058$. Concerning the AOI of NDRT, drivengers decreased their dwell time between P3.1 and P3.3, $p < 0.05$, between P3.1 and P3.4, $p < 0.001$, P3.3 and P3.4, $p = 0.001$, as well as between P3.3 and P3.4, $p < 0.05$. For all the periods, drivengers spent more time fixating the driving task than the NDRT areas, all $p < 0.001$.

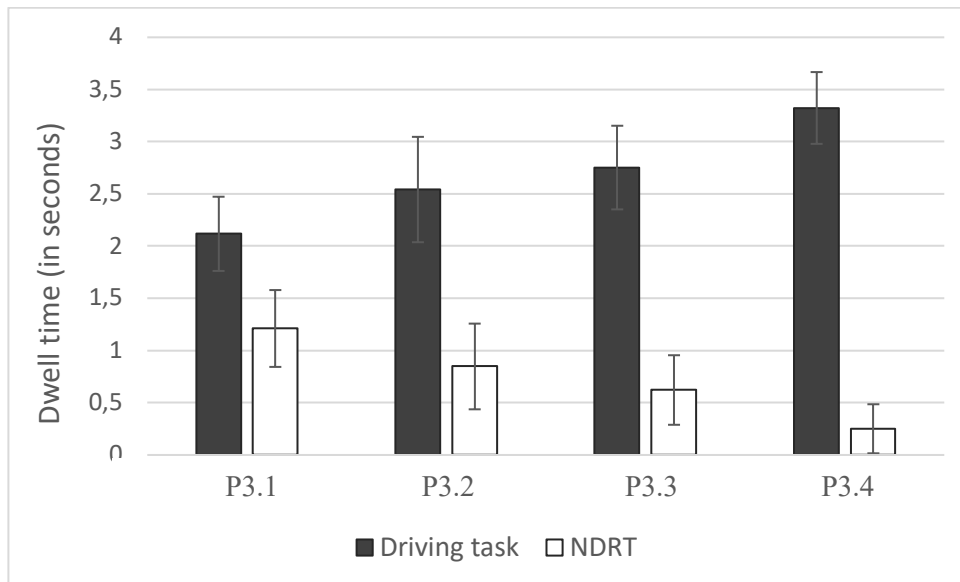


Fig. 3. Dwell time (in seconds) on the NDRT and driving task areas, according to the period.

3.2. Number of switches

3.2.1. Evolution between the begin and the end of the automated drive

The ANOVA conducted on the number of switches made between the begin of the automated drive (P1) and the end of the automated drive phase (P2) did not reveal any significant main or interaction effect.

3.2.2. Evolution between the automated drive and the TOR

Analysis revealed first a main effect of the driving expertise, $F(1, 27) = 4.74, p < 0.05, \eta^2 = 0.15$. Novices drivers made significantly more switches between the resumption of the driving task and the NDRT ($M = 3.65, SD = 1.05$) than expert drivers ($M = 2.48, SD = 1.63$).

There is also an interaction effect between the period and the driving expertise, $F(1, 27) = 8.45, p < 0.01, \eta^2 = 0.24$ (cf. Fig. 3 below). Tukey's post-hoc tests showed that novices made more switches for P3 (i.e., the TOR period) than expert drivers, $p < 0.01$, while no significant difference was found for P2 (i.e., the automated drive period). There was no significant difference between P2 and P3, whatever the driving experience. However, it should be noted that without correction, post-hoc tests showed that novices increased their switches between P2 and P3, $p < 0.05$, while expert drivers reduced them, all $p = 0.05$. Analyses did not reveal a main effect of the period, *ns*.

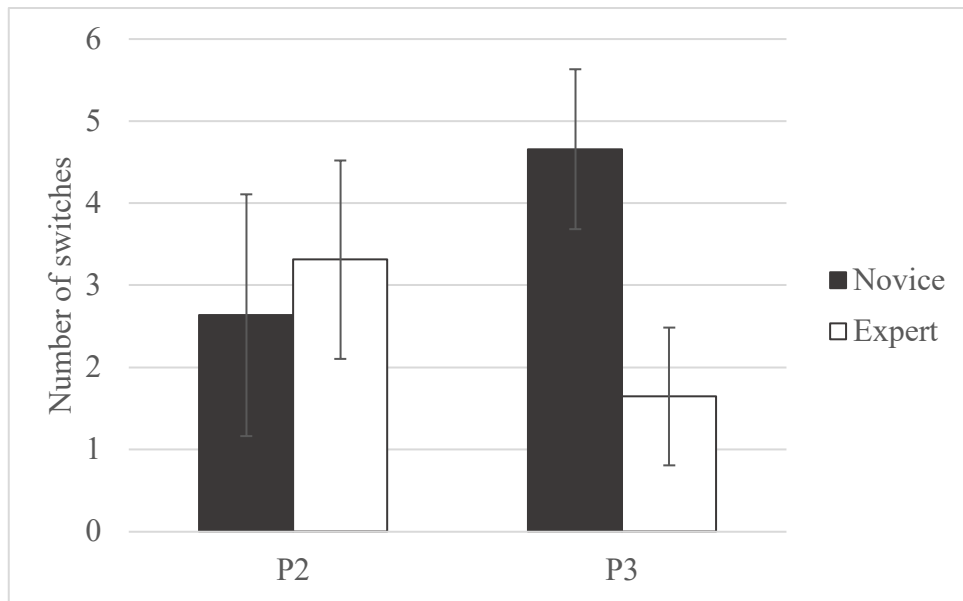


Fig. 4. Number of switches made between the resumption of the driving task and the NDRT, according to the period (i.e., P2 and P3) and the level of driving experience.

3.2.3. Evolution across the TakeOver Request (TOR)

A main effect of the period was firstly showed, $F(3, 81) = 5.83, p = 0.001, \eta^2 = 0.19$. Tukey's post-hoc tests revealed a significant reduction of the number of switches only at P3.4, that is showed by the significant differences observed between P3.1 and P3.4, $p < 0.001$, as well as between P3.2 and P3.4, $p < 0.05$ (cf. Table 1 below). No significant difference was found between the other periods.

Table 2

Mean and standard deviation of the number of switches made by period during the TOR.

	P3.1	P3.2	P3.3	P3.4
Mean	1.10	0.84	0.69	0.26
Standard deviation	1.20	0.93	0.89	0.51

Analyses also indicated a main effect of the driving experience, $F(1, 27) = 20.88, p < 0.001, \eta^2 = 0.45$, novices making a higher number of switches ($M = 4.66, SD = 1.72$) than expert drivengers ($M = 1.65, SD = 1.77$). The interaction effect between the period and the driving experience was not significant.

4. Discussion

Driving a car is principally a visual activity which requires sufficient attentional resources to acquire an optimal level of situation awareness and driving safely (Dingus et al., 2006; Heikoop et al., 2016; Sivak, 1996; Underwood et al., 2009). Remove humans from the driving task loop appears as a good idea insofar 78% of road crashes are caused by an attentional deficit of the driver (Dingus et al., 2006). However, removing humans partially like in L3 AV led to rethinking the driving task itself. The literature of the last decades points out new risks emerging of the resumption of driving after an automated drive (see Navarro, 2018 for a review). The expected benefices of driving automation appear not achieve yet in a context of automated driving do not fully replace human driver. Why drivengers suffer of an attentional deficit at the takeover? Several complementary explanations are provided by the literature (e.g., out-of-the-loop effect, underload, overload), but generally agreed to blame an attentional impairment of the drivenger. In addition, studies showed that novice have particularly degraded takeover performances (Chen et al., 2021; Ouddiz et al., 2018; Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016), that is very worrying as drivengers of tomorrow would never reach a high level of driving expertise (Bainbridge, 1983; Vlakveld, 2015). The present study aimed to investigate closely novice and expert drivengers' attention before the effective takeover in order to better understand their impaired performances. To this aim, we focused on the evolution of their attentional engagement toward the driving task and the NDRT during the automated drive and the TOR. We also evaluate their task switching behavior between the driving task and the

NDRT since we know that it is costly and can impair performances (Castanheira, Loparco & Otto, 2020; Monsell, 1995; Kiesel et al., 2010).

Results of drivers' engagement (i.e., dwell time) revealed that drivers were highly engaged in the NDRT and pay little attention to the driving task as soon as the automated mode was activated. When the TOR occurred (i.e., 18 seconds of takeover preparation and 2 seconds of takeover), they progressively disengage from the NDRT to reengage in the resumption of the driving task. Analyses of task switching behaviour revealed that they reduced the number of switches made between the two tasks only at the last sub-period, that is at least 3 seconds before the system deactivation. These findings partially confirm our hypotheses and highlight the difficulty for drivers to disengage from the NDRT of film watching when they have to takeover. Even if they devoted less and less time to the NDRT to devote more and more time to the driving task, they constantly switch between the two tasks until the last 3 seconds when they significantly reduce their task switching behaviour to resume the driving task. Switching between tasks increases reaction time and more generally decreases performances at both tasks because of the task set reconfiguration needed and its additional load (cf. Koch et al., 2018, for a review). The cost associated with drivers' high proportion of task switching behavior until the last moment is therefore able to provide a complementary explanation of the poor takeover performances observed in the literature (cf. Navarro, 2018, for a review). This switching cost can be reduced by increasing preparation time to reconfigure task set parameters (Kiesel et al., 2010; Vandierendonck et al., 2010). In our context of takeover in L3 AV, further studies need to investigate how interrupting the NDRT as soon as the TOR occurs helps to improve drivers' takeover performances.

Driving a car is principally a visual activity which requires sufficient attentional resources to acquire an optimal level of situation awareness and driving safely (Heikoop et al., 2015; Klauer et al., 2006; Sivak, 1996; Underwood, Chapman, & Crundall, 2009). In the present

study, the NDRT was a film watching, that is a visual-auditory task. It is therefore impossible to fully conducted in a dual task way the visual component of the NDRT with the driving task resumption as both tasks shared the visual modality. However, the auditory modality of the NDRT can be conducted in dual task with the driving one, as long as you hold sufficient attentional resources. As highlighted by our results, novices made significantly more switches between the NDRT and the resumption of the driving task during the TOR period. Their high proportion of task switching could be explained by their difficulty to dual tasking, because of their lack of attentional resources available to resume both the driving task and perform a NDRT. The high task switching behavior and its associated cost among novices is therefore able to provide a complementary explanation of their particularly poor takeover performances reported in the literature (Chen et al., 2021; Ouddiz, Paubel and Lemercier, 2020; Samuel et al., 2016; Wright et al., 2016).

5. Conclusion

Literature highlights that partially removing humans of the loop of driving imply new safety issues. Studies shows that the takeover is a critical period, particularly for novice drivers who have the more degraded behaviours. The present study reveals for the first time that the attentional deficit of drivengers at the takeover could be associate to the cost of their task switching behaviour during the TOR period. Investigating more precisely the link between driving experience, task switching and takeover quality appears even more crucial as it is predicted that drivenger of tomorrow would never achieve a high level of driving expertise by the lack of manual driving practice (Hancock, 2014; Vlakveld, 2015a).

Funding

This work was supported by the CLLE laboratory (Cognition, Langues, Langages, Ergonomie) and the CLESCO (Comportement, Langage, Education, Socialisation, Cognition) PhD school.

CRedit contribution statement

Sharon Ouddiz: Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Formal analysis, Investigation. **Céline Lemerrier:** Conceptualization, Methodology, Writing – Original Draft, Supervision, Funding acquisition.

Declaration of competing interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. In *Analysis, design and evaluation of man-machine systems* (p. 129-135). Elsevier.
- Chen, F., Lu, G., Lin, Q., Zhai, J., & Tan, H. (2021). Are novice drivers competent to take over control from level 3 automated vehicles? A comparative study with experienced drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 81, 65-81.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.05.012>
- da Silva Castanheira, K., LoParco, S., & Otto, A. R. (2021). Task-evoked pupillary responses track effort exertion : Evidence from task-switching. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 21(3), 592-606. <https://doi.org/10.3758/s13415-020-00843-z>
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., & Gupta, S. (2006). *The 100-car naturalistic driving study. Phase 2 : Results of the 100-car field experiment*. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety
- Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. *Proceedings of the Human Factors Society annual meeting*, 32(2), 97-101.
- 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.
- Hancock, P. A. (2014). Automation : How much is too much? *Ergonomics*, 57(3), 449-454.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2013.816375>
- Heikoop, D. D., de Winter, J. C. F., van Arem, B., & Stanton, N. A. (2016). Psychological constructs in driving automation : A consensus model and critical comment on construct proliferation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 17(3), 284-303.
<https://doi.org/10.1080/1463922X.2015.1101507>

- Kienle, M., Damböck, D., Kelsch, J., Flemisch, F., & Bengler, K. (2009). Towards an H-Mode for highly automated vehicles : Driving with side sticks. *Proceedings of the 1st international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*, 19-23.
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological Bulletin*, 136(5), 849-874. <https://doi.org/10.1037/a0019842>
- Kim, H. S., Yoon, S. H., Kim, M. J., & Ji, Y. G. (2015). Deriving future user experiences in automated vehicle. *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '15*, 112-117. <https://doi.org/10.1145/2809730.2809734>
- Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging*, 15(1), 126-147. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.15.1.126>
- Lemercier, C., Perez, M., Ouddiz, S., Paubel, P.-V., & Labeye, E. (2018). Interaction with of type 4 automated car : The impact of expertise in the visual scanning quality during the few seconds until the resumption of the steering wheel. *International Congress of Applied Psychology (ICAP 2018)*.
- Meiran, N., Chorev, Z., & Sapir, A. (2000). Component Processes in Task Switching. *Cognitive Psychology*, 41(3), 211-253. <https://doi.org/10.1006/cogp.2000.0736>
- Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). *How Do Drivers Behave in a Highly Automated Car?* 514-521. <https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1365>
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Daly, M., & Carsten, O. M. J. (2014). Transition to manual : Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.09.005>

- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J. D., Johansson, E., Green, C. A., Katazaki, 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>
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models : What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. C. Schwing (Éds.), *Human Behavior and Traffic Safety* (p. 485-524). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Monsell, E. M. (1995). New and revised reporting guidelines from the Committee on Hearing and Equilibrium. In *Otolaryngology–Head and Neck Surgery* (Vol. 113, Numéro 3, p. 176-178). SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134-140.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Navarro, J. (2019). A state of science on highly automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 366-396. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1439544>
- O’Brien, H. L. (2010). The influence of hedonic and utilitarian motivations on user engagement : The case of online shopping experiences. *Interacting with Computers*, 22(5), 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.001>
- O’Brien, H. L., & Toms, E. G. (2008). What is user engagement? A conceptual framework for defining user engagement with technology. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59(6), 938-955. <https://doi.org/10.1002/asi.20801>
- Ouddiz, S., Paubel, P.-V., & Lemercier, C. (2020). How do novice and expert drivers prepare for takeover when they are drivengers of a level 3 automated vehicle ? Investigation of their visual behaviour. *Le travail humain*, 83(4), 361-378.
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Overload depending on driving experience and

situation complexity : Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*, 51, 343-349. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.014>

Reimers, S., & Maylor, E. A. (2005). Task Switching Across the Life Span : Effects of Age on General and Specific Switch Costs. *Developmental Psychology*, 41(4), 661-671. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.41.4.661>

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>

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: Journal of the Transportation Research Board*, 2602(1), 115-120. <https://doi.org/10.3141/2602-14>

Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.

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>

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing : II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127.

Singh, S. (2015). *Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey*.

Sivak, M. (1996). The information that drivers use : Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25(9), 1081-1089.

Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. C. M., & Nilsson, L. (2014a). 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>

Strand, N., Nilsson, J., Karlsson, I. C. M., & Nilsson, L. (2014b). 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>

Trafton, J. G., & Monk, C. A. (2007). Task interruptions. *Reviews of human factors and ergonomics*, 3(1), 111-126.

Underwood, G., Chapman, P., & Crundall, D. (2009). Experience and visual attention in driving. *Human factors of visual and cognitive performance in driving*, 89-116.

Vandierendonck, A., Liefvooghe, B., & Verbruggen, F. (2010). Task switching : Interplay of reconfiguration and interference control. *Psychological bulletin*, 136(4), 601.

Vlakveld, W. (2015a). Transition of control in highly automated vehicles. *The Hague: SWOV Insti-tute for Road Safety Research*.

Vlakveld, W. (2015b). *Transition of control in highly automated vehicles : A literature review*.

Wasylyshyn, C., Verhaeghen, P., & Sliwinski, M. J. (2011). Aging and task switching : A meta-analysis. *Psychology and Aging*, 26(1), 15-20. <https://doi.org/10.1037/a0020912>

Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455.

<https://doi.org/10.1518/001872008X288394>

Wright, T. J., Samuel, S., Borowsky, A., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2016a). Experienced drivers are quicker to achieve situation awareness than inexperienced drivers in situations of transfer of control within a Level 3 automated environment. *Proceedings of the Human*

Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 60(1), 270-273.

<https://doi.org/10.1177/1541931213601062>

Wright, T. J., Samuel, S., Borowsky, A., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2016b). Experienced drivers are quicker to achieve situation awareness than inexperienced drivers in situations of transfer of control within a Level 3 automated environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 270-273.

<https://doi.org/10.1177/1541931213601062>

Young, K., & Regan, M. (2007). *Driver distraction : A review of the literature*. 29.

Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002a). Attention and automation : New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 178-194.

<https://doi.org/10.1080/14639220210123789>

Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002b). Malleable Attentional Resources Theory : A New Explanation for the Effects of Mental Underload on Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(3), 365-375.

<https://doi.org/10.1518/0018720024497709>

Young, M. S., & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324-1339.

<https://doi.org/10.1080/00140130701318855>

4. Les points clés sur le chapitre 3

- Afin de mieux comprendre pourquoi les novices ont davantage de difficultés à reprendre la conduite, cette étude vise à évaluer l'effet de l'expertise routière sur les comportements de switch attentionnel chez les drivengers durant la période de préparation à la reprise.
- Les mesures oculométriques ont été utilisées afin d'évaluer, chez les 29 participants, la fréquence de switch réalisés entre la tâche annexe et la tâche de conduite, et son évolution, durant la période de 18 secondes correspondant à l'alerte à la reprise.
- Les résultats montrent que les drivengers diminuent significativement leur fréquence de switch seulement 3 secondes avant la reprise effective.
- Les novices ont une fréquence de switch deux fois plus importante que les experts, pouvant expliquer leur incapacité à engager autant de ressources attentionnelles à la reprise de la tâche de conduite que les experts et ainsi leurs performances de reprise particulièrement altérées.

Chapitre 4

Comment améliorer les capacités des drivengers à reprendre le volant ? Impact des caractéristiques de la tâche annexe chez les conducteurs novices et experts.

Ouddiz, S., Paubel P.-V., & Lemerrier, C. (soumis le 27/06/2024). How to enhance performance and attentional capacity of drivengers in level 3 automated driving? Impact of Non-Driving-Related Task (NDRT) demand and level of driving experience.

1. Introduction au chapitre

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'impact du niveau d'expertise routière sur le comportement de switch attentionnel des drivengers. Cette étude a fait l'objet d'un article soumis dans une revue à comité de lecture le 27 juin 2024. La troisième étude présentée en amont nous a permis de mettre en évidence que les performances détériorées observées chez les novices lors de la reprise pouvaient être expliquées par leurs comportements de switch élevé entre la NDRT et la reprise de la conduite. Le coût du switch (Monsell, 2003) est en effet capable d'expliquer les performances détériorées des drivengers, et en particulier des novices, dans la mesure où une partie de leurs ressources attentionnelles est dédiée au switch. Ainsi, leur quantité de ressources attentionnelles accordées à la tâche de conduite sont amoindries. Les comportements de switchs plus élevés chez les novices s'avère d'autant plus problématique dans la mesure où la conduite exige davantage de ressources que pour les experts. Dans cette quatrième et dernière étude, nous nous sommes intéressés à la dynamique malléable des ressources attentionnelles des drivengers, en fonction de leur niveau d'expertise routière. Sur

la base du modèle MART (Young et Stanton, 2002a, b, 2007), notre objectif était d'évaluer dans quelle mesure la demande relative à la NDRT menée durant le mode automatisé était capable d'impacter leurs capacités attentionnelles et leurs performances de reprise. Les facteurs identifiés comme critique lors de l'étude 1 sur la perception de la difficulté de la reprise ont ici été contrôlés (i.e., NDRT de jeu et reprise après un trajet automatisé long, dans une situation routière où la densité du trafic était élevée). Les résultats en faveur du modèle MART ont ainsi permis de mieux comprendre les performances détériorées observées chez les drivengers, et en particulier chez les novices. Les résultats sont discutés au regard des modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles fixes et malléables et de switch attentionnel.

2. Résumé de l'étude

2.1. Introduction

La littérature s'accorde sur les risques émergents des véhicules automatisés d'aujourd'hui et de demain. Il a en effet été montré que reprendre le contrôle du véhicule après avoir expérimenté un trajet automatisé (i.e., niveau 3, SAE 2016) est une tâche à risques accidentels élevés où les performances des drivengers sont altérées. Plusieurs explications sont apportées dans la littérature, avec notamment l'effet « out-of-the-loop » où le fait de retirer le drivenger de la boucle de la conduite engendrerait des difficultés à réacquérir une conscience de la situation lors de la reprise, et des comportements de conduite dégradés (Merat et al., 2019). Une autre explication est apportée par le modèle MART des ressources attentionnelles malléables, développé depuis 2002 par Young et Stanton (2002a, b, 2007). Selon ce modèle, les capacités attentionnelles des individus seraient malléables, c'est-à-dire qu'elles vont s'adapter à la demande de la tâche en cours de réalisation. Ainsi, la sous-charge mentale expérimentée par les drivengers lors du mode automatisé (De Winter et al., 2014) engendrerait

un rétrécissement artificiel des ressources attentionnelles disponibles. Les drivengers ne disposeraient ainsi pas de suffisamment de ressources disponibles afin de répondre aux exigences accrues requise par la tâche de reprise en cas d'inopérabilité du système. Le premier objectif de cette étude était d'évaluer l'impact du niveau de charge mentale des drivengers sur leur comportement visuo-attentionnel, leur charge mentale et leurs performances lors de la reprise en situation complexe et exigeante. Notre deuxième objectif était d'évaluer l'impact de la demande relative à la NDRT en fonction du niveau d'expertise routière. Nous nous attendions à ce que l'engagement au sein d'une NDRT peu exigeante engendre des comportements de reprise détériorés en comparaison à une NDRT peu exigeante, en particulier chez les novices.

2.2. Méthode

Une première étude pré-expérimentale a été menée sur 60 participants afin de sélectionner les jeux qui constituaient la NDRT de jeu sur tablette pour l'expérience principale. Les jeux étaient sélectionnés afin d'induire une charge mentale faible ou élevée, tout en ayant un niveau d'appréciation et d'engagement élevé. 68 conducteurs novices ou experts âgés de moins de 35 ans, dont 54 retenus pour les analyses, ont participé à l'expérience principale. Celle-ci consistait en trois circuits routiers sur simulateur de conduite (i.e., circuit de familiarisation, circuit d'entraînement à la conduite automatisée de niveau 3, circuit expérimental). Les drivengers novices ou experts étaient assignés à l'une des deux conditions de NDRT (peu exigeante vs exigeante). Trois jeux par conditions étaient sélectionnés. Il était demandé aux participants de jouer à un ou plusieurs des trois jeux comme ils le souhaitaient durant les périodes de conduite automatisé mais d'interrompre le jeu dès le début de l'alerte à la reprise (i.e., alerte visuo-auditive d'une durée de 10 secondes). La reprise de la conduite manuelle survenait après 20 minutes de conduite automatisée, dans une situation routière très

complexe (i.e., trafic dense, entrée sur route urbaine, météo défavorable, suivi de véhicule à vitesse irrégulière de conduite). La charge mentale (i.e., variabilité du rythme cardiaque, mesures auto-rapportées), le comportement visuo-attentionnel (i.e., dwell time, fréquence de switch) et les performances de reprise (i.e., accélération, freinage, distance avec le véhicule suivi, time headway ou temps estimé nécessaire au véhicule du conducteur pour atteindre l'emplacement du véhicule suivi) étaient évalués.

2.3. Résultats et discussion

Les résultats montrent que les drivengers s'engageant au sein d'une NDRT peu exigeante ont une charge mentale et des performances de reprise altérés en comparaison avec les drivengers s'engageant au sein d'une NDRT exigeante (i.e., incapacité à augmenter leur charge mentale durant la reprise ; comportements de freinage à risque, plus brusque et intense, lors des périodes de décélération du véhicule suivi). Par ailleurs, les résultats mettent en évidence que l'engagement au sein d'une NDRT peu exigeante détériore particulièrement le comportement visuo-attentionnel et les performances des novices (i.e., moins d'engagement au sein des zones visuelles relatives à la tâche de conduite lors de la préparation à la reprise ; plus de difficultés à s'adapter à la situation de suivi de véhicule à vitesse irrégulière et à anticiper les changements de vitesse du véhicule suivi, ce qui s'observait par des accélérations plus intense et brusque dans les situations de décélération du véhicule suivi et une augmentation du time headway à minima 40 secondes après la reprise contre 20 secondes pour les drivengers des autres conditions). Ces résultats supportent le caractère malléable des ressources attentionnelles et permettent d'expliquer l'impact négatif de la sous-charge mentale sur les performances de reprise des drivengers, en particulier chez les novices. Ainsi, cette étude a pour la première fois permis de valider le modèle MART (Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020)

dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3, soutenant le caractère dynamique et malléable des capacités attentionnelles individuelles.

3. Article 4: How to enhance performance and attentional capacity of drivengers in level 3 automated driving? Impact of Non-Driving-Related Task (NDRT) demand and level of driving experience.

Abstract

The literature agrees on the emerging risks of today's and tomorrow's automated vehicles. It has indeed been shown that regaining control of the vehicle after experiencing level 3 automated drive is a task with high accident risks where driving performances are impaired. Several explanations are provided in the literature, including the "out-of-the-loop" effect were removing the drivenger (i.e., contraction of driver and passenger, level 3 users) from the driving loop would lead to difficulties in regaining situational awareness during takeover, and degraded driving behavior. Another explanation is provided by the MART model of malleable attentional resource. According to this model, individuals' attentional capacities are malleable, meaning they will adapt to the demands of the task being performed. Thus, the mental underload experienced by drivengers during automated mode would artificially shrink the available attentional resources. Drivengers would thus not have enough available resources to meet the increased demands required by the takeover task in case of system inoperability. The first objective of this study was to evaluate the impact of drivengers' mental workload on their visuo-attentional behavior, mental workload, and performances during the takeover in a complex and demanding situation. The drivengers were engaged in a Non-Driving-Related Task (NDRT) of game played on a tablet, pre-selected to be either demanding or undemanding, while being

appreciated and engaging. Our second objective was to assess the impact of the NDRT demand relative to the level of driving experience. Indeed, novices have particularly impaired behaviors during driving takeover and experience a higher workload than experts due to the higher demand of the driving task. The results support the MART model. Indeed, engagement in undemanding NDRTs resulted in deteriorated takeover performances compared to demanding NDRTs, especially among novices. The results are discussed in relation to visuo-attentional behavior, mental workload, and the malleable attentional resources model.

Introduction

Driving a car is primarily a visual task that demands sufficient attentional resources to maintain optimal situation awareness and ensure safe driving [1–4]. It is widely recognized that human error, particularly attentional deficits of drivers, is the leading cause of road crashes [5–8]. Fully automated driving systems are expected to significantly reduce road fatalities by completely eliminating human involvement in the driving process. However, before completely replacing the driver, automated driving systems are currently capable of only partially managing driving task. For instance, level 2 out of 5, as defined by the Society of Automotive Engineers [9] can handle both lateral and longitudinal control of the vehicle but only in specific driving situations such as highway roads, and always with the driver's monitoring. The level 3 automated driving system, currently being implemented, aims to manage all driving tasks while considering the environment, enabling driving in a wider range of situations without requiring continuous driver monitoring. However, the drivenger (i.e., driver-passenger, user of level 3) must be prepared to resume the driving task, known as takeover, when the automated system is no longer capable of ensuring safe driving. This entails the drivenger disengaging from the Non-Driving-Related Task (NDRT) conducted during automated driving and refocusing on the driving task for takeover.

The issue of takeover periods has been a major concern in recent years. Research in psychology and ergonomics, focusing on human factors, has demonstrated that resuming the driving task after Level 3 automated driving poses significant risks in terms of road safety. For instance, drivengers exhibit degraded performance following a takeover, including longer reaction times in critical driving situations, a higher risk of collisions and a greater instability in the longitudinal and lateral control of the vehicle [10–13]. This deteriorated performance is generally attributed to drivengers' disengagement from the driving task during the automated mode. They become "out of the loop," allocating little or no attention to the driving task, particularly the visual exploration of the road scene [14–16]. When the system alerts the drivenger about the upcoming deactivation of the automated mode, the drivenger must return to the loop. However, research shows that drivengers do not have enough time to regain optimal situational awareness, which hinders their ability to perceive, understand, and anticipate the takeover driving situation [17–19]. Thus, the takeover situation poses a high-risk accident scenario, as drivengers who are "out of the loop" struggle to form a comprehensive and optimal representation of the driving situation they encounter during the takeover.

Another explanation is provided by the Malleable Attentional Resources Theory (MART) developed by Young & Stanton [20–23]. On one hand, takeovers are known to be demanding periods due to various factors. Firstly, the system failure preceding the takeover requires drivengers to adequately assess the system's state, which demands attentional resources. Additionally, the time pressure imposed by takeovers can increase drivengers' Mental WorkLoad (MWL), leading to increased stress and task demands [24–28]. The system is also more likely to deactivate in complex and potentially hazardous situations, which are known to be highly demanding [29,30]. Lastly, the attentional switch required when drivengers engage in a NDRT during automated driving, or the time-share pursuit (i.e., dual task) when they have to resume the driving task, can further increase the demand placed on takeovers [30–

32]. On the other hand, the low demand placed on drivengers during automated driving leads to a low MWL [33]. According to MART [21,22,34], this underloaded state of drivengers results in a reduction or shrinkage of attentional resources as an adaptive mechanism of attentional capacity to match the task demand. Therefore, when a takeover request occurs, drivengers may not possess sufficient attentional resources to cope with the sudden increase in task demand, requiring an adaptation time to regain optimal attentional capacity.

According to this model, performing a sufficiently demanding NDRT during automatic mode would help maintain optimal attentional capacities and preserve performance during takeover. However, the impact of engagement in an NDRT on takeover performance is unclear due to contradictory results reported in the literature. Regarding studies showing a negative effect, for example, Merat et al. [30] demonstrated that involvement in an NDRT (a 20-question, audio-vocal task) had a detrimental impact on takeover performance in terms of reacting to critical situations. This finding was also supported by Wandtner et al. [35], who found that the risks associated with takeover were higher for drivengers engaging in an NDRT (a visual-motor task) compared to those who did not. On the other hand, some studies support the model by showing a positive effect of NDRT engagement on performance. For instance, Yoon and Ji [36] as well as Lee, Yoon, and Ji [37] found a negative correlation between MWL and takeover time, as well as between MWL and vehicle control (i.e., the time between being alerted and first interacting with the vehicle). In other words, an increase in MWL induced by the NDRT reduced takeover time and enhanced lateral and longitudinal control of the vehicle. Pampel et al. [38] demonstrated that drivengers perform better in terms of maintaining their lateral position after takeover when they engage in a game NDRT during automated mode compared to when they do not perform an NDRT.

Several factors may account for the contradictory results observed in the literature. Firstly, the demand of NDRT conducted during automatic mode is not consistently controlled

and may impact takeover performance [37,39]. Additionally, the continuation of NDRT during takeover may explain the results supporting a negative effect of NDRT. Involvement in an NDRT alongside takeover can lead drivengers to a dual-task situation [32] or task alternation [31], increasing MWL, reducing attention allocated to the takeover task, and impairing situational awareness and performance. Studies on the subject also vary in terms of the type and demand of driving situations encountered during takeover. Complex driving situations, such as heavy traffic, can increase MWL or the discrepancy between attentional capacity and task demand, resulting in deteriorated takeover performance [29,40,41]. According to multiple resource theory [42], the modalities of NDRT can impact takeover performance. Engagement in an NDRT that involves the same attentional resource reservoirs as driving (e.g., visuo-motor) may interfere more with the driving task compared to an NDRT involving different reservoirs (e.g., audio-vocal). This has been demonstrated by Wandtner et al. [43] and Roche et al. [44] in an automated driving context. According to the MART model, engaging in a sufficiently demanding NDRT that shares the same resource reservoirs as the driving task would enable the maintenance of optimal attentional capacities and preservation of takeover performance. Therefore, the characteristics of the NDRT (e.g., task demand, modalities, interruption time) and those of the driving situation encountered during takeover (e.g., complexity) can impact takeover performance by influencing either the availability of individual attentional capacities (e.g., underload or overload) or the required demand for takeover.

In addition to the characteristics of the NDRT, the characteristics of the drivengers themselves can also impact takeover performance. For example, studies conducted by Samuel et al. [45] and Wright et al. [46] have shown that middle-aged expert drivengers regain optimal situation awareness quicker than young novice drivengers in terms of gaze towards potential hazards (i.e., within at least 6 seconds vs. 8 seconds after the takeover request). It is well-known that driving experience is one of the most influential factors in road crashes in non-automated

driving contexts [4,5]. Novice drivers, who have not yet automated the operational level of the driving task [47], require a higher threshold of attentional resources, which can lead to an overloaded state and deteriorated performance [29,48,49]. Their limited driving experience also contributes to poor strategic visual behavior and a less developed mental model of the driving task, further increasing the demand required for driving and decreasing their situation awareness [4,50]. In the context of automated driving, the additional time required for novices to regain optimal situation awareness could be explained by the MART model. Since driving is more demanding for novices compared to experts, resuming control in automated driving would be more demanding for them. Therefore, their attentional capacity would require additional time to meet the demand required for takeover, resulting in longer periods of impaired performance compared to experts. However, it remains unclear whether the difference observed by Samuel et al. [45] and Wright et al. [46] is due to age or driving experience, as both of these internal factors can increase the risk of accidents in non-automated driving contexts [51–53]. Considering that future drivengers may not develop a sufficient level of driving experience to maintain safe behaviors [54,55], investigating their ability to regain control of their automated vehicles becomes crucial.

The first objective of this study was to gain a better understanding of the deteriorated performance observed among drivengers during the takeover, particularly among those with a low level of driving experience. The second objective was to evaluate a means of improving the performance of drivengers during the takeover, and thus reduce the emerging risks of Level 3 automated vehicles. Finally, the third objective was to provide empirical evidence for the MART model of malleable attentional resources [21,22,34]. In order to meet these objectives, this study investigated the extent to which involvement in a sufficiently demanding NDRT during automated mode enhanced the attentional capacities and performance of novice and expert drivengers, compared with a low-demanding NDRT. A preliminary study was conducted

to select NDRTs based on their demand and the resulting mental workload induced in participants. Six tablet games were chosen, three with low demand and three with high demand. The level of engagement and enjoyment in the games was controlled to be high. In the main study, novice and expert participants were exposed to a Level 3 automated driving situation. The experiment consisted of a simulator familiarization phase, an automated driving training phase, and a 30-minute experimental phase. The latter included a takeover in a complex and demanding driving situation, such as following a vehicle with irregular speed, high traffic density, urban road conditions, and bad weather. During automated drive, the drivengers engaged in a NDRT, selected to be either high or low demanding.

The takeover performance, visual-attentional behaviour and mental workload of the drivengers were assessed. We expected novices to experience a greater mental workload, visuo-attentional behaviour and worse performance than experts. With regard to the demand of the NDRT, we expected that the mental underload induced by the low-demanding NDRT would lead to a temporary reduction in the amount of attentional resources available during the automated mode, with the drivengers not having enough resources available when the demand of the task suddenly increased during the takeover. Thus, we expected that drivengers engaging in a low-demanding NDRT would have a lower mental load, a more degraded visual-attentional behaviour and a more degraded takeover performance than drivengers engaging in a high-demand NDRT during the automated mode. Finally, we expected that involvement in a low-demand NDRT would lead to more deteriorated visual-attentional behaviour and performance in novices than in experts, due to the greater gap between their attentional capacities and the demand of the takeover task (see Fig 1).

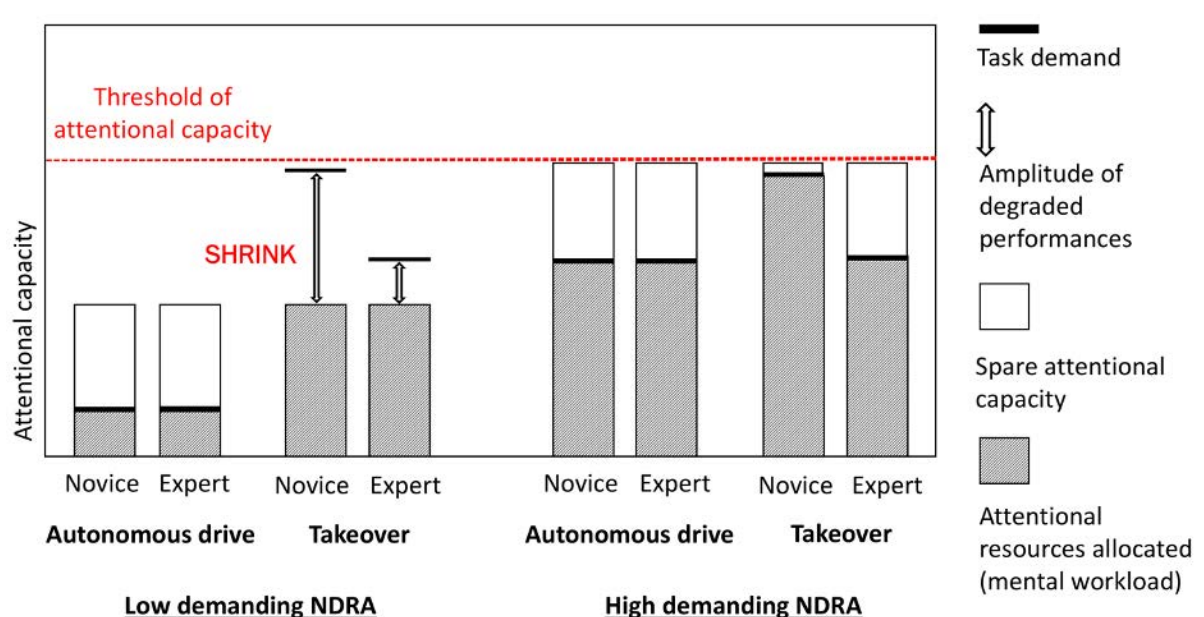


Fig 1. Expected dynamic of attentional resources during the automated driving in a demanding and complex takeover driving situation, according to the NDRT demand and the level of driving experience. The Fig describes the pool of attentional resources, divided between the attentional resources used (i.e., corresponding to the MWL) and the spare attentional capacity. The attentional resources were allocated on the NDRT during the automated drive and on the resumption of the driving task during the takeover. The difference between the task demand associated to the takeover and the attentional resources allocated on the resumption of the driving task results on the amplitude of degraded performances.

Materials and Methods

Participants

68 novices or experts under the age of 35 took part in the experiment. Participants were recruited from the Toulouse Jean-Jaurès University campus or through social networks (e.g., the Facebook group of Toulousains). Due to difficulties in adapting to the driving simulator, 8 participants who did not complete the experiment were excluded from the analysis.

Additionally, 6 more participants were excluded due to equipment problems. In total, 54 participants were included for analysis (see Table 1). Participants were assigned a code based on their experimental condition and sequential number, ensuring the anonymity of participants throughout the entire data processing and analysis process.

Table 1

Descriptive statistics of participants included in the analyses.

	Low demanding NDRT		High demanding NDRT	
	Novices	Experts	Novices	Experts
Age in years				
<i>M (SD)</i>	20.27 (1.49)	27.71 (5.03)	22.50 (3.94)	28.87 (4.63)
Gender				
<i>Number of men</i>	4	6	7	8
<i>Number of women</i>	7	8	5	7

Measures

Driving simulator and level 3 automated driving system

The driving simulator is a Peugeot 207 working with OKTAL Scanner software, located at the University Toulouse II Jean-Jaurès. This fixed simulator is composed of three front and two rear displays, allowing 360° immersion in the simulated road environment. The automated system was simulated using OKTAL's Scanner software. A touchscreen integrated into the vehicle's dashboard displayed information about the system's status: a green square indicated that the automated mode was activated, while a red square indicated that it was deactivated. Switching between manual and automated driving modes was achieved by pressing a touch-sensitive button on the screen, which displayed the label "automated mode". The HandOver

Request (HOR) consisted of the following voice message: "Automated mode available, please press the button to activate it." Upon pressing the button, the following voice message would appear: "Automated mode activated, you can release the steering wheel," accompanied by an ascending beep to indicate activation. When transitioning between automated and manual driving modes, the TakeOver Request (TOR) occurred 10 seconds prior to the actual deactivation of automated mode. It included the following voice message: "Attention, you will resume driving in 10 seconds, 5, 4, 3, 2, 1," followed by a descending beep to signify deactivation. This voice alert was accompanied by a visual alert on the touchscreen, featuring a loading bar that displayed the remaining time before the user would resume driving.

Simulated driving tracks

Three circuits were designed for the experiment. The first familiarization circuit consisted of 15 minutes of manual driving on various types of roads to help the participants become accustomed to simulated driving. It concluded with a handover and a takeover phase, during which the participants interacted with the automated system for the first time. The second training circuit, lasting 20 minutes, focused on automated driving and included three takeover and three handover periods. The complexity of these periods varied based on the road type (e.g., motorway, urban roads, departmental roads) and traffic density (low, medium, high), aiming to familiarize the participants with takeover and handover in different, more or less demanding driving situations. The experimental circuit, lasting 30 minutes, consisted of a 5-minute period of manual driving, followed by a 20-minute period of automated driving, and concluded with another 5-minute period of manual driving. The handover situation occurred on a departmental road without other road users present. The takeover situation was designed to be highly complex and demanding, as described by Paxion, Galy and Berthelon [29]. The TakeOver Request (TOR) was initiated when the vehicle transitioned from automated mode on county roads to

urban roads. The automated mode was deactivated in a complex and demanding driving situation with heavy traffic and various road users, including cars, motorbikes, bicycles, and challenging weather conditions such as rain, fog, and wind. The resumption occurred in a scenario where the drivengers was following a vehicle that exhibited irregular speed. The speed of the vehicle oscillated successively between 25 and 50 km/h every 10 seconds, with a variation of ± 3 seconds. This particular driving circumstance is acknowledged to be demanding [56], as the drivengers needs to continuously anticipate the behavior of the lead vehicle to appropriately adjust their own speed and prevent collisions.

Preliminary study for the selection of the Non-Driving-Related Tasks (NDRT)

A preliminary study was conducted to choose the games that would constitute the NDRT of the main study. The objective was to select games that would induce either low or high MWL. Additionally, the games were chosen based on their high level of engagement and appreciation to prevent NDRT disengagement during the automated mode. A total of 24 games available on the Android Playstore were initially pre-selected. Among them, 12 games belonged to the 'puzzle' category, while the remaining 12 belonged to the 'simulation' category. It was hypothesized that games in the puzzle category would generate a higher MWL compared to those in the simulation category. These games were chosen due to their similarity to the driving task, involving visual encoding, processing primarily spatial and verbal information, and requiring motor response. This choice aligned with the MART model [21,22,34] on the assumption that it fits the multiplicity of attentional resources described by Wickens [42]. Furthermore, the games were pre-selected based on their high ratings on the Android Playstore. While the initial plan was to include games with a rating of 4.5/5 or higher, it was later decided

to broaden the selection criteria and include games with a rating of 4.3/5 or higher (see Table 2).

Table 2

Names of games, Playstore rating by game and average rating by category.

Name of games in the puzzle category	Playstore's rating on 5	Name of games in the simulation category	Playstore's rating on 5
Brainilis	4.5	Les sims	4.5
Linedoku	4.6	Zoo 2: Animal park	4.5
Logic Master 2 - Tricky & Odd	4.5	The tribez	4.4
Logic Master 1	4.6	Home Street	4.6
Quick Brain	4.7	City Mania	4.5
Sudoku	4.6	L'éveil des civilisations	4.6
Zhed	4.8	SimCity (Build It)	4.5
2048	4.5	My Hospital	4.3
Rullo	4.7	FarmVille : Tropic Escale	4.5
Calculator : The Game	4.7	Tropical Paradise : Town Island	4.6
Pipeline	4.5	FarmOn !	4.5
VOI	4.7	Forge of Empire	4.4
Total, $M (SD)$	4.62 (0.10)		4.49 (0.09)

The recruitment period for this pre-experimental study took place from 01/04/2021 to 25/06/2021. 60 participants under the age of 40 ($M = 27.86$, $SD = 3.23$, $N_{\text{women}} = 32$, $N_{\text{men}} = 28$)

took part in the preliminary study. They were randomly assigned to one of the four experimental conditions. Each condition included six games, with three games from each category. Participants completed a written consent form and were instructed to play each game on a tablet for a duration of 10 minutes. Prior to starting each 10-minute game, participants were required to read the game instructions provided and complete the tutorial. At the conclusion of each game, participants were asked to assess their MWL and rate their engagement with the game using Qualtrics software on a computer. Each game was evaluated 20 times in total. Eight participants were excluded from the analysis due to incomplete participation caused by hardware issues. Therefore, a total of 52 participants ($N_{\text{women}} = 29$, $N_{\text{men}} = 23$) were included in the subsequent analyses.

Self-reported MWL was assessed using the NASA-RTLX scale [57,58] (see section “Subjective rating of mental workload: NASA-RTLX” below). Engagement within the game was evaluated through a questionnaire (see section “Game Engagement Questionnaire” below). The appreciation item of the engagement scale was analyzed separately. Games with an appreciation score equal to or lower than 3 out of 5 were excluded. Games with an engagement score (excluding the appreciation item) below 25, on a scale ranging from 0 to 50, were also excluded. The NASA-RTLX score was calculated by averaging the ratings of the six dimensions, each rated on a scale from 0 to 100. The three games with the highest scores and the three games with the lowest NASA-RTLX scores were selected for the main study (see Table 3). An ANOVA analysis confirmed that the two game categories differed significantly in their NASA-RTLX scores. The puzzle category ($M = 51$, $SD = 14.03$) had a higher score compared to the simulation category ($M = 24.7$, $SD = 9.23$), $F(1, 76.8) = 106$, $p < 0.001$.

Table 3

Scores (mean and standard deviation) of NASA-RTLX, appreciation and engagement of the games selected for the main study.

Name of the selected game	NASA-RTLX score <i>M (SD)</i>	Appreciation score <i>M (SD)</i>	Engagement score <i>M (SD)</i>
Brainilis	53,49 (13.30)	3.19 (0.83)	29.31 (6.95)
Logic Master 1	52,05 (17.29)	3.61 (3.61)	35.06 (8.98)
Rullo	45,50 (6.88)	3.64 (3.64)	33.36 (9.23)
SimCity (Build It)	26,44 (9.32)	3.23 (1.30)	31.00 (9.98)
My Hospital	23,76 (8.95)	3.25 (1.22)	33.00 (11.31)
FarmVille : Tropic Escape	24,00 (9.80)	3.40 (1.20)	30.07 (10.73)

Driving behaviour

The takeovers occurred in car-following situations, where the lead vehicle exhibited an irregular speed pattern. The mean and mean standard deviation amplitude of acceleration and brake (i.e., pressure on the pedal, between 0 and 1) were computed to evaluate drivengers' responses to changes in the speed of the leading vehicle. Higher value in mean acceleration or brake indicated more acceleration or brake behaviour while higher value in mean std of acceleration or brake indicated greater pressure on the accelerator or brake pedal and therefore greater variations and instability in the longitudinal control. The mean minimum distance between the drivengers' vehicle and the lead vehicle was assessed as an indicator of driving performance and adaption to the change of speed of the lead vehicle. We also computed the time headway as it takes into account the velocity of the drivengers' vehicle in addition to the distance (i.e., distance divided by the drivenger's velocity). The time headway represents the estimated time needed for the drivengers' vehicle to reach the location of the lead vehicle. Particularly, the

mean minimum time headway was used here as an indicator of the drivenger's adaptation to the changes in the speed of the lead vehicle [56]. The lower the mean minimum time headway, the more difficult it is for the drivenger to adapt and anticipate changes in the speed of the lead vehicle.

Visual behaviour

Participants' visual behavior was recorded using SMI eye-tracking glasses. We analyzed fixations on two Areas of Interest (AOIs): the driving task (including fixations through the windscreen, front lateral windows, mirrors and dashboard) and the NDRT (fixations on the tablet). Only fixations that lasted at least 80 ms were recorded, based on the general assumption that visual elements fixated for longer durations would be processed by participants. The allocation of attention between the driving task and the NDRT was evaluated based on the dwell time, representing the time (in seconds) allocated to the fixation of an AOI (i.e., driving task; NDRT). More specifically, we used the percentage of dwell time as the proportion of time allocated to make fixations on an AOI, relative to the total fixation time. Dwell time of the driving task areas and of the tablet were computed in percentage compared to the total dwell time. As it takes into account both the number of fixations and the mean fixation duration (i.e., these two parameters are multiplied), dwell time is considered the most general and stable indicator of the amount of visual attention devoted to a specific task [59]. Additionally, the time in seconds it took for participants to make their first fixation through the driving task areas was computed as an indicator of the takeover time (i.e., the time it took for drivengers' attention to be redirected to the driving task). We also computed the number of switches made between the two tasks before and during the TOR, as an indicator of the task switching behaviour. Indeed, a higher task switching behaviour is generally associated with a higher MWL and impaired performances at both tasks conducted [31].

Physiological measure of mental workload: Heart-Rate Variability (HRV)

The electrocardiogram (ECG) was recorded using a Biosemi device (Active Two), with two electrodes placed on the skin surface. Time-domain indicators of Heart Rate Variability (HRV) were calculated using Kubios software (i.e., SDNN and pNN50). These indicators are widely used in the literature [60] as they have been shown to reflect changes in mental workload (MWL). A decrease of SDNN and pNN50 indicators is associated with an increase in MWL [61,62].

Subjective rating of mental workload: NASA-RTLX

The French validation [63] of the NASA-TLX scale [58] was used to measure participants' subjective mental workload. This scale consists of 6 dimensions: mental demand, temporal demand, physical demand, effort, performance, and frustration. Each dimension is evaluated on a scale ranging from 0 to 100. The unweighted version of the scale, the NASA-RTLX [57], where the score is calculated by averaging the scores of the 6 dimensions, was utilized here. It has been shown that the unweighted version is sufficient for assessing self-reported mental workload, even in its French version [57,63].

Game engagement

A questionnaire aimed at assessing engagement within the game was adapted and translated from the Revised Game Engagement Questionnaire (R-GEM) [64], itself adapted from the Game Engagement Questionnaire [65], the Technology Acceptance Model (TAM) [64,66], the User Engagement Scale (UES) [67] and the Presence Questionnaire (PQ) [64,68]. The questionnaire consisted of 11 questions on a 5-point Likert scale, ranging from Not at all to Extremely (see S1 Appendix). In addition to items assessing overall engagement in the game, the questionnaire incorporated other dimensions of engagement within a game: presence, flow, immersion,

absorption, presence and appreciation [65]. The S1 Appendix presents the items used in this questionnaire, the dimensions of engagement evaluated by each item, as well as the reference of the original questionnaire from which each item is taken.

Procedure

The experiment took place at the Driving Simulator located at the Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse (MSHS-T, University of Toulouse II Jean-Jaurès). The entire experience lasted 2 hours. The recruitment period for this experimental study took place from 01/02/2022 to 15/10/2022. The experiment started with an explanation of the procedure, after which participants completed a written consent form that included the study title, purpose, procedures, duration, confidentiality assurance, voluntary participation statement, and contact information for the researchers. They were then equipped with eye-tracking glasses and heart rate sensors. Participants were initially asked to watch a landscape video with calm music for 5 minutes, in order to record baseline ECG and pupillary diameter data. They were then immersed in a 15-minute familiarization session with driving in the simulator and Level 3 automated driving. Initially, participants were instructed to drive at a gradual speed to become accustomed to the simulation. The circuit included various types of roads and concluded with a handover and a takeover phase in low complex driving situations (i.e., departmental roads with no other road users). This allowed them to have an initial interaction with the interface of the automated system. After a debriefing and a short break, they were asked to perform the Level 3 automated driving training phase. During this 20-minute circuit, participants were instructed to play games on the tablet only when the automated mode was activated. Participants were free to play any of the three games from their experimental condition and change games as they wished. They were asked to interrupt the game and place the tablet on the passenger seat as soon as the TakeOver Request (TOR) was initiated. This allowed them to have a first

experience with the games and practice alternating between the NDRT and resuming driving. The training circuit consisted of 3 handover and 3 takeover phases. After another debriefing and a break, they were then asked to perform the 30-minute experimental circuit. At the end of the experience, participants completed several questionnaires (i.e., NASA-RTLX and socio-demographic questions). They were thanked for their participation, and a debriefing regarding the study objectives was provided to them.

Data analyses

Mixed or factorial ANOVA were conducted for each measure (see the Results part for more details about each measure), using the Jamovi software (version 2.3.18.0). When a significant effect (i.e., $p < 0.05$) was found, the ANOVA was followed by post-hoc tests. A Tukey's correction was mainly used to compute the p-value. Some post-hoc tests were computed without corrections, for example, when the number of comparisons reported is low compared to the number of comparisons calculated by the software (e.g., when the repeated variable has 5 modalities). The choice of the correction was always mentioned in the analyses. The *Jamovi* software was used to compute the analyses. Outliers were treated with the winsorizing method (Field, 2009) consisting to replace the outlier by the maximum value that is not an outlier.

Data relating to behavioural, eye-tracking and heart rate variability measurements were analyzed over different periods. More specifically, the behavioural data was divided into periods corresponding to the acceleration and deceleration phases of the vehicle monitored during the takeover. In fact, only this takeover period is relevant to the analysis of data relating to driving behaviour and performance. The eye-tracking and cardiac data were divided according to the state of the automated system, i.e. according to the type of driving in progress. More specifically, the eye-tracking data were divided between periods of automated driving, TOR and takeover in order to assess changes in visual-attentional behaviour. As for the data

relating to heart rate variability, an indicator of mental workload, this time we were interested in periods of manual driving, different periods of automated driving (start, middle and end of automated mode) as well as different sub-periods occurring during the TOR and after the takeover. For methodological reasons concerning the analysis of the cardiac signal, we decided to divide these periods into 20-second durations.

Results

Driving behaviours

A mixed 5x2x2 ANOVA was used for the mean and mean std amplitude of acceleration as well as for the mean minimum distance and the mean minimum time headway). A mixed 3x2x2 ANOVA was conducted for the mean and mean std amplitude of brake, by focusing on the periods P1, P2, and P4, given that P3 and P5 did not involve any amplitude of brake behavior among drivengers, making it impossible to analyze. The NDRT demand (i.e., low, high) and the driving experience (i.e., novice, expert) were used for between-subject factors, and the driving period for within-subject factor (i.e., P1, P2, P3, P4 and P5). The period of analyses (i.e., from the effective resumption of the driving task to 1 minute after) was divided into 5 periods of approximately 10 seconds (+/- 3 seconds). Each period corresponds to a speed of the lead vehicle (i.e., P1: 50 km/h, P2: 25 km/h, P3: 50 km/h, P4: 25km/h, P5: 50km/h), which means that as soon as the lead vehicle pressed the gas pedal or the bake, a new sub-period starts. Each period includes an acceleration or deceleration of the vehicle being followed until it reaches its programmed speed (i.e., 25 or 50 km/h). The particularity of P1 is that the time between the acceleration and reaching its programmed speed of 50 km/h is longer than the other periods, as it corresponds to the insertion of the vehicle in front of the drivenger's vehicle, after which the followed vehicle accelerates to reach 50 km/h. Descriptive statistics for each measure analyzed are presented according to the period (see Table 4).

Table 4

Descriptive statistics (i.e., mean and standard deviation) of the driving behaviour measures (i.e., the mean and mean standard deviation amplitude of acceleration and brake, mean minimum distance, mean minimum time headway), according to the periods of interest (i.e., P1, P2, P3, P4 and P5).

		P1	P2	P3	P4	P5
Mean Acceleration	<i>M</i>	0.31	0.12	0.27	0.14	0.27
	<i>SD</i>	0.06	0.05	0.08	0.05	0.09
Mean <i>SD</i> of Acceleration	<i>M</i>	0.17	0.14	0.13	0.16	0.13
	<i>SD</i>	0.04	0.04	0.06	0.05	0.07
Mean brake	<i>M</i>	2.75	22.30	/	15.64	/
	<i>SD</i>	4.18	7.88	/	9.53	/
Mean <i>SD</i> of brake	<i>M</i>	9.27	45.10	/	35.79	/
	<i>SD</i>	11.42	13.08	/	18.17	/
Mean minimum distance (in meters)	<i>M</i>	11.18	11.57	12.31	13.50	13.75
	<i>SD</i>	1.55	5.54	4.91	7.99	7.27
Mean minimum time headway (in seconds)	<i>M</i>	1.29	1.34	1.69	1.59	1.83
	<i>SD</i>	0.31	0.62	0.76	0.94	0.87

The ANOVA conducted on the mean amplitude of acceleration indicated a significant main effect of the period, $F(4, 200) = 141.59, p < 0.001, \eta^2 = 0.74$ (see Table 4). The post-hoc tests indicated a higher mean amplitude of acceleration during P1 than P3 and P5 ($p = 0.007$ and $p = 0.044$, respectively), higher during P3 and P5 than during P4 (both $p < 0.001$) and higher during P4 than P2 ($p = 0.018$). There were no significant differences between P3 and P5,

ns. The main effect of driving experience, $F(1, 50) = 5.27, p = 0.026, \eta^2 = 0.1$, revealed that novices had higher mean amplitude of acceleration ($M = 0.24, SD = 0.05$) than experts ($M = 0.21, SD = 0.04$). A marginally significant effect of NDRT demand was found, $F(1, 50) = 3.6, p = 0.064, \eta^2 = 0.07$, suggesting a tendency for drivengers in the low-demanding NDRT condition to have higher mean amplitude of acceleration ($M = 0.23, SD = 0.05$) than those in the high-demanding condition ($M = 0.21, SD = 0.04$). An interaction effect was also observed between the period, driving experience, and NDRT demand, $F(4, 200) = 2.65, p = 0.035, \eta^2 = 0.05$ (see Fig 2 and 3). Tukey's post-hoc tests did not reveal any significant differences. However, *LSD* (Fisher) post-hoc tests were conducted, considering the lesser conservatism compared to Tukey. The *LSD* post-hoc tests indicated that novices had higher mean amplitude of acceleration than experts only in the low-demanding NDRT condition for P1 ($p = 0.042$), P2 ($p = 0.028$), and P4 ($p = 0.009$). Analyses also revealed that novices in the low-demanding NDRT condition had higher mean amplitude of acceleration than novices in the high-demanding NDRT condition for P2 ($p = 0.01$) and P4 ($p = 0.017$). No other significant effects were found, *ns*.

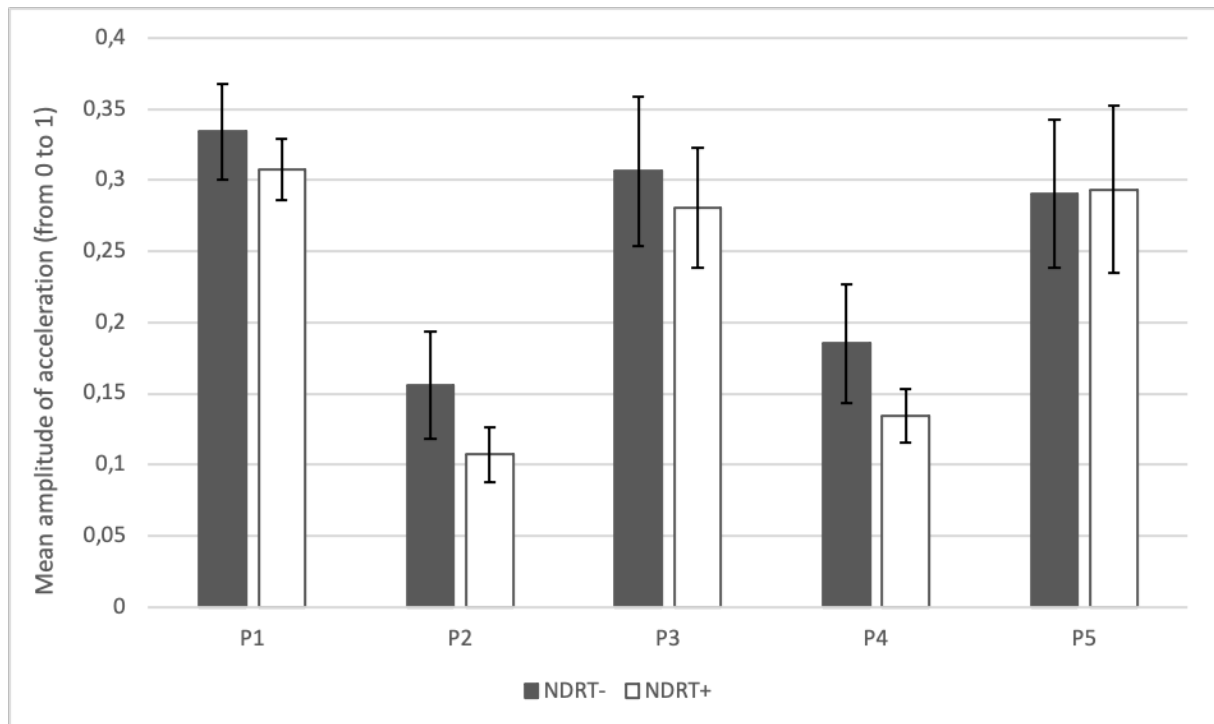


Fig 2. Mean amplitude of acceleration for novices, according to the period (P1, P2, P3, P4 and P5) and the demand of the NDRT (i.e., “NDRT +” corresponds to the high demanding NDRT condition, “NDRT-” to the low demanding one).

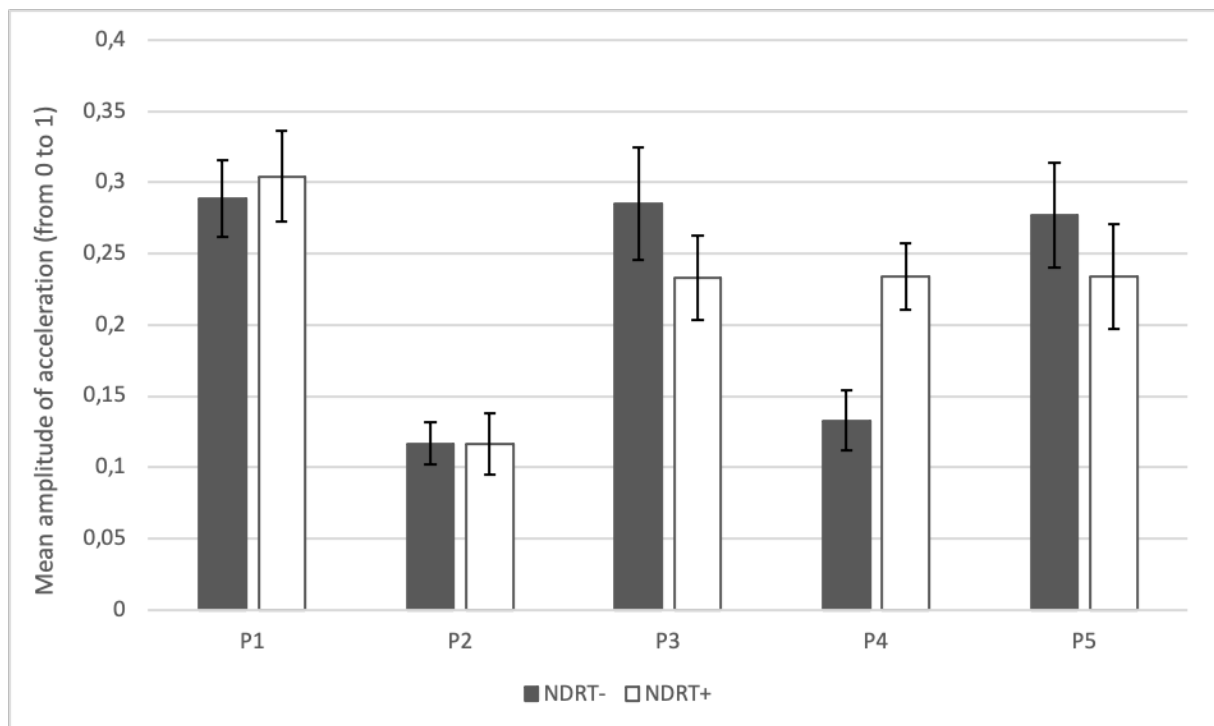


Fig 3. Mean amplitude of acceleration for experts, according to the period (P1, P2, P3, P4 and P5) and the demand of the NDRT (i.e., “NDRT +” corresponds to the high demanding NDRT condition, “NDRT-” to the low demanding one).

The ANOVA on the mean *SD* amplitude of acceleration demonstrated a main effect of the period, $F(4, 200) = 10.03, p < 0.001, \eta^2 = 0.17$ (see Table 4). Drivengers exhibited a higher mean *SD* amplitude of acceleration during P1 and P4 compared to P2, P3, and P5, $p > 0.001$ (except between P4 and P5, $p < 0.016$, P4 and P2, $p = 0.005$ and between P1 and P5, $p = 0.002$). Furthermore, the main effect of driving experience, $F(1, 50) = 5.09, p = 0.029, \eta^2 = 0.09$, revealed a higher mean *SD* amplitude of acceleration for novices ($M = 0.16, SD = 0.04$) compared to experts ($M = 0.14, SD = 0.03$). Lastly, a marginally significant effect was found between driving experience and NDRT demand, $F(1, 50) = 3.60, p = 0.087, \eta^2 = 0.06$ (see Fig 4). Tukey's post-hoc tests indicated that novices had a higher mean *SD* amplitude of acceleration than experts only in the low-demanding NDRT condition ($p = 0.037$), while no other significant differences were observed, *ns*.

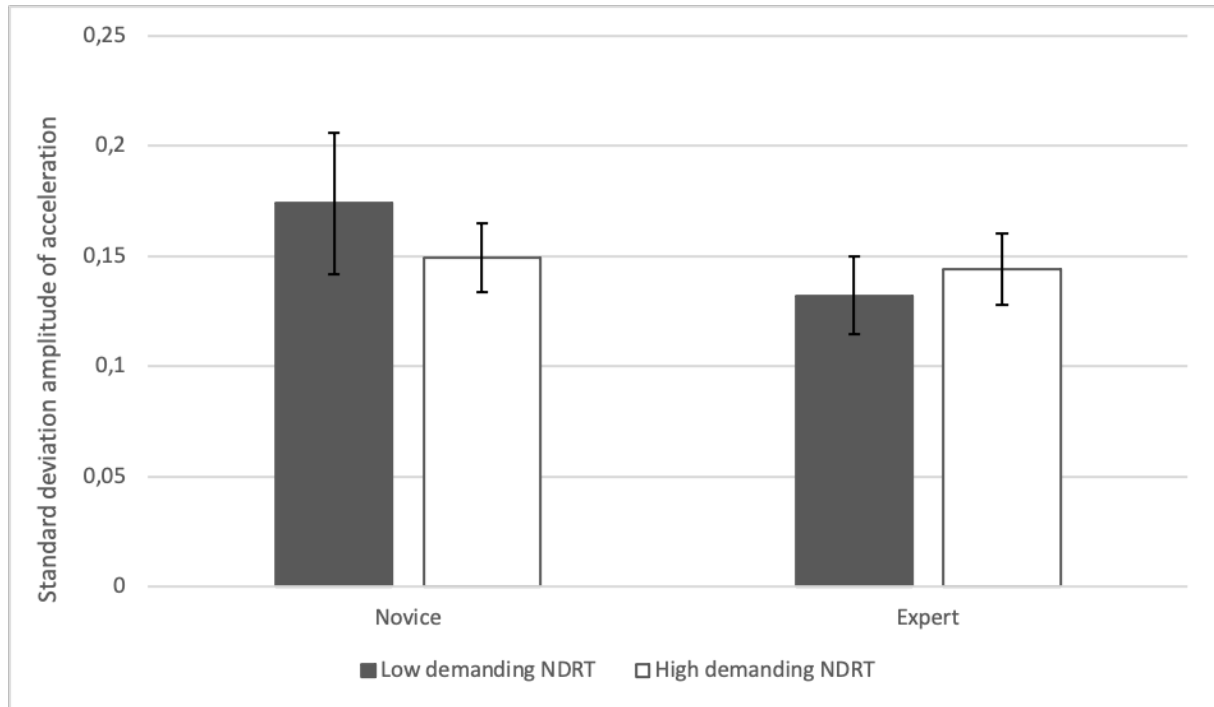


Fig 4. Mean standard deviation amplitude of acceleration according to the driving experience (i.e., novice vs expert) and the NDRT demand (i.e., low vs high demanding NDRT).

The analyses demonstrated a significant main effect of the period on the mean amplitude of brake, $F(2, 100) = 156.6, p < 0.001, \eta^2 = 0.76$ (see Table 4). Drivengers exhibited a higher mean amplitude of brake during P2 compared to P4, and higher during P4 than P1, all $p < 0.001$. The main effect of driving experience, $F(1, 50) = 4.7, p = 0.035, \eta^2 = 0.09$, revealed a higher mean amplitude of brake for novices ($M = 15.38, SD = 6.2$) compared to experts ($M = 12.22, SD = 5.13$). Furthermore, a main effect of NDRT demand was observed, $F(1, 50) = 5.11, p = 0.028, \eta^2 = 0.09$, indicating that drivengers exhibited a higher mean amplitude of brake in the low-demanding NDRT condition ($M = 15.18, SD = 6.64$) than in the high-demanding one ($M = 12.06, SD = 4.45$). No other significant results were found, *ns*.

Regarding the mean *SD* amplitude of brake, the analyses revealed a significant main effect of the period, $F(2, 100) = 158.39, p < 0.001, \eta^2 = 0.76$ (see Table 4). Drivengers exhibited a higher mean *SD* amplitude of brake during P2 compared to P4, and higher during P4 than P1,

all $p < 0.001$. A main effect of driving experience was also observed, $F(1, 50) = 4.53, p = 0.038, \eta^2 = 0.08$, indicating that novices had a higher mean *SD* amplitude of brake ($M = 33.6, SD = 12.12$) than experts ($M = 27.43, SD = 10.27$). Additionally, a main effect of NDRT demand was found, $F(1, 50) = 4.43, p = 0.047, \eta^2 = 0.08$, revealing a higher mean *SD* amplitude of brake for drivengers in the low-demanding NDRT condition ($M = 32.93, SD = 13.3$) than in the high-demanding one ($M = 27.39, SD = 8.74$). No other significant results were observed, *ns*.

The ANOVA conducted on the mean minimum distance first highlighted a main effect of the period, $F(4, 200) = 3.84, p = 0.005, \eta^2 = 0.07$ (see Table 5). Tukey's post-hoc tests only revealed an increase of the mean minimum distance between P2 and P3, $p = 0.048$. There was also a marginally significant interaction effect between the period and the driving experience, $F(4, 200) = 2.14, p = 0.077, \eta^2 = 0.04$ (see Fig 4). Post-hoc tests were conducted without correction given the high number of tests computed by the software in comparison with the number of tests we are interested in. The results did not indicate any significant difference between the periods among novices, excepted a marginally significant increase between P4 and P5, $p = 0.055$. However, among experts, results indicated an increase of the mean minimum distance between P1 and P3, $p = 0.03$, P1 and P4, $p = 0.005$, and between P1 and P5, $p = 0.003$. Post-hoc tests also indicated an increase of the mean minimum distance among experts between P2 and P3, $p = 0.005$, P2 and P4, $p = 0.007$, as well as between P2 and P5, $p = 0.005$. There was finally an increase of the minimum distance among experts between P3 and P4, $p = 0.05$ as well as between P3 and P5, both $p = 0.038$. There was no other significant difference, *ns*.

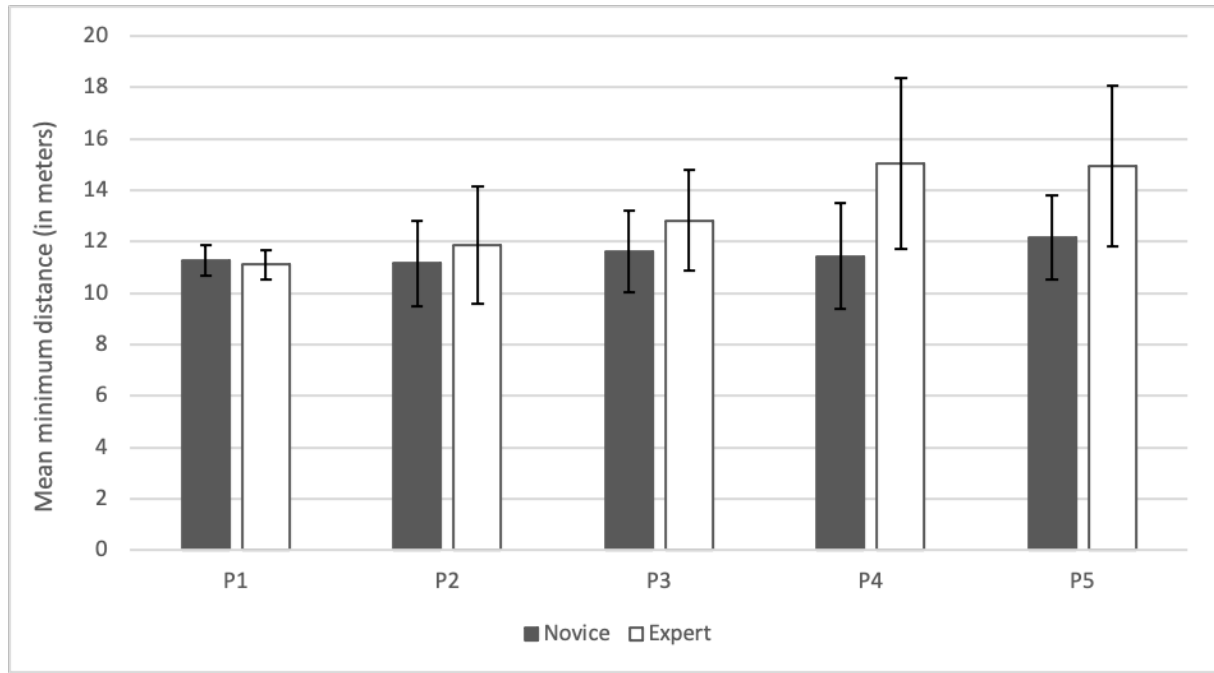


Fig 5. Mean minimum distance according to the period (i.e., P1, P2, P3, P4 and P5) and the driving experience (i.e., novice vs expert).

The ANOVA conducted on the mean minimum time headway first revealed a main effect of the period, $F(4, 200) = 11.51, p < 0.001, \eta^2 = 0.19$ (see Table 4). Tukey's post-hoc tests indicated an increase of the mean minimum time headway between P1 and P3, P1 and P5, P2 and P3, P2 and P5, and between P4 and P5, all $p < 0.001$. Analyses also showed a marginally significant interaction effect between the period and the driving experience, $F(4, 200) = 2.34, p = 0.056, \eta^2 = 0.04$ (see Fig 6). Post-hoc tests (i.e., without correction) indicated that the mean minimum time headway of novices increased between P1 and P3, $p = 0.044$, as well as between P1 and P5, $p = 0.048$, and between P2 and P3, $p = 0.003$, P2 and P5, $p = 0.03$, and P4 and P5, $p < 0.001$. Concerning experts, results indicated an increase of the mean minimum time headway from P1 to P3, P4 and P5, as well as from P2 to P3, P4 and P5, all $p < 0.001$, and an increase between P4 and P5, $p = 0.007$. There was no other significant difference, *ns*.

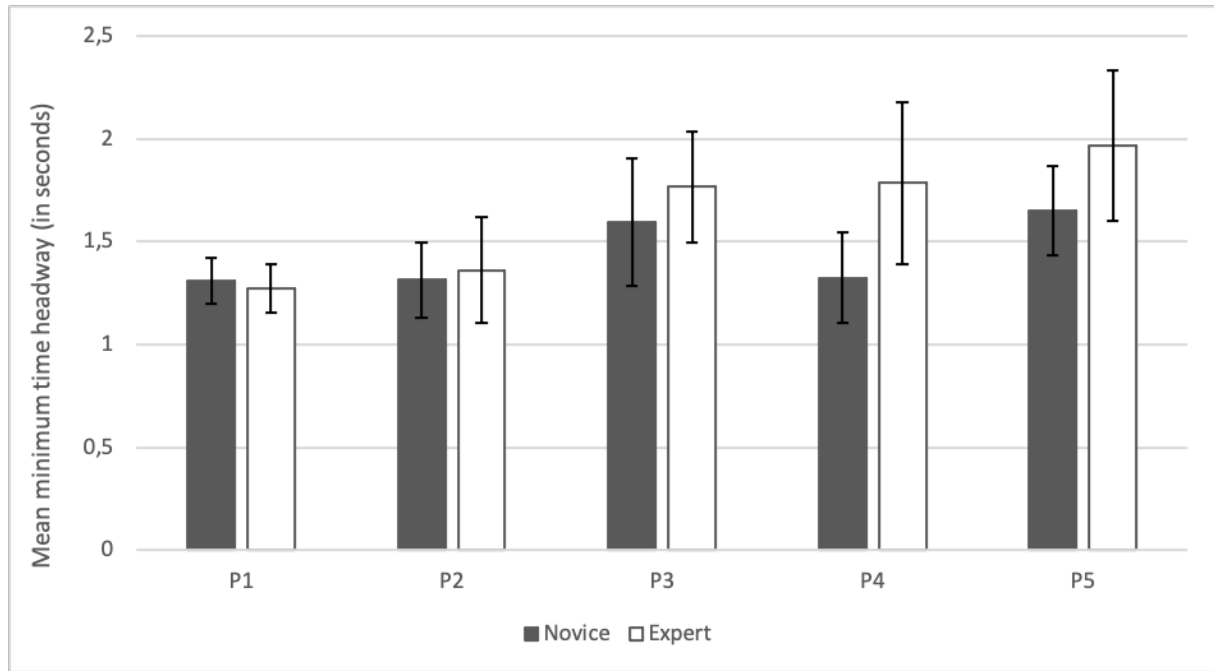


Fig 6. Mean minimum time headway (in seconds), according to the period (i.e., P1, P2, P3, P4 and P5) and the driving experience (i.e., novice vs expert).

The ANOVA also highlighted an interaction effect between the period, the driving experience and the NDRT demand, $F(4, 200) = 2.48, p = 0.045, \eta^2 = 0.05$ (see Fig 7 and 8). When they were in the low demanding NDRT condition, post-hoc tests (i.e., without corrections) showed that novices increased their mean minimum time headway only between P4 and P5, $p < 0.001$. However, in the high demanding NDRT condition, their mean minimum time headway increased between P1 and P3, $p = 0.016$, P2 and P3, $p = 0.002$, and P4 and P5, $p = 0.008$, with a decrease between P3 and P4, $p = 0.05$. Concerning experts, results indicated that when they were in the low demanding NDRT condition, they increased their mean minimum time headway between P1 and P3, $p < 0.001$, P1 and P5, $p = 0.004$, P2 and P3, $p < 0.001$, P2 and P5, $p = 0.036$, and P4 and P5, $p = 0.005$. In the high demanding NDRT condition, post-hoc tests showed that experts increased their mean minimum time headway from P1 to P3, P4 and P5 (i.e., $p = 0.049$, $p = 0.003$ and $p < 0.001$, respectively), from P2 to P3, $p = 0.002$, P4 and P5, both $p < 0.001$, and between P3 and P5, $p = 0.016$. There was a tendency for experts to

exhibit a higher mean minimum time headway during P1 when they were in the high demanding NDRT condition than when they were in the low demanding NDRT one, $p = 0.07$. There was also a tendency for experts to exhibit a higher mean minimum time headway than novices during P4 when they were in the high demanding NDRT condition, $p = 0.07$. The ANOVA did not indicate other significant main or interaction effect, *ns*.

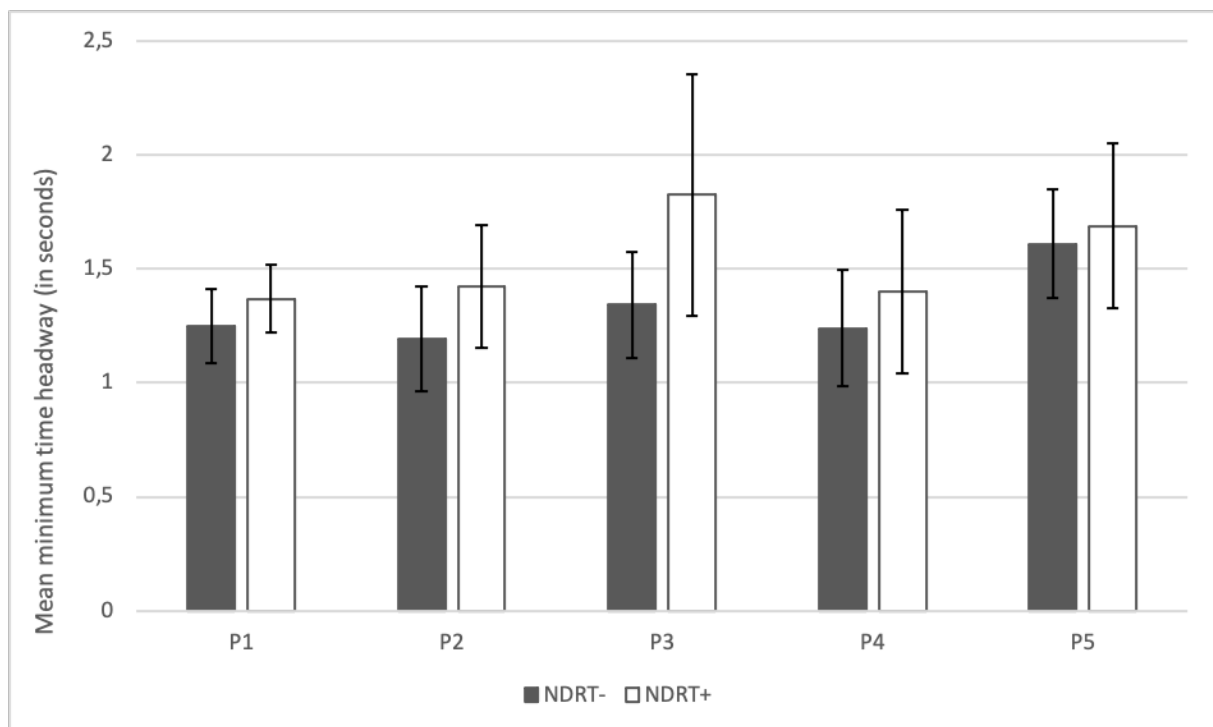


Fig 7. Mean minimum time headway (in seconds) for novices, according to the period (P1, P2, P3, P4 and P5) and the demand of the NDRT (i.e., “NDRT +” corresponds to the high demanding NDRT condition, “NDRT-” to the low demanding one).

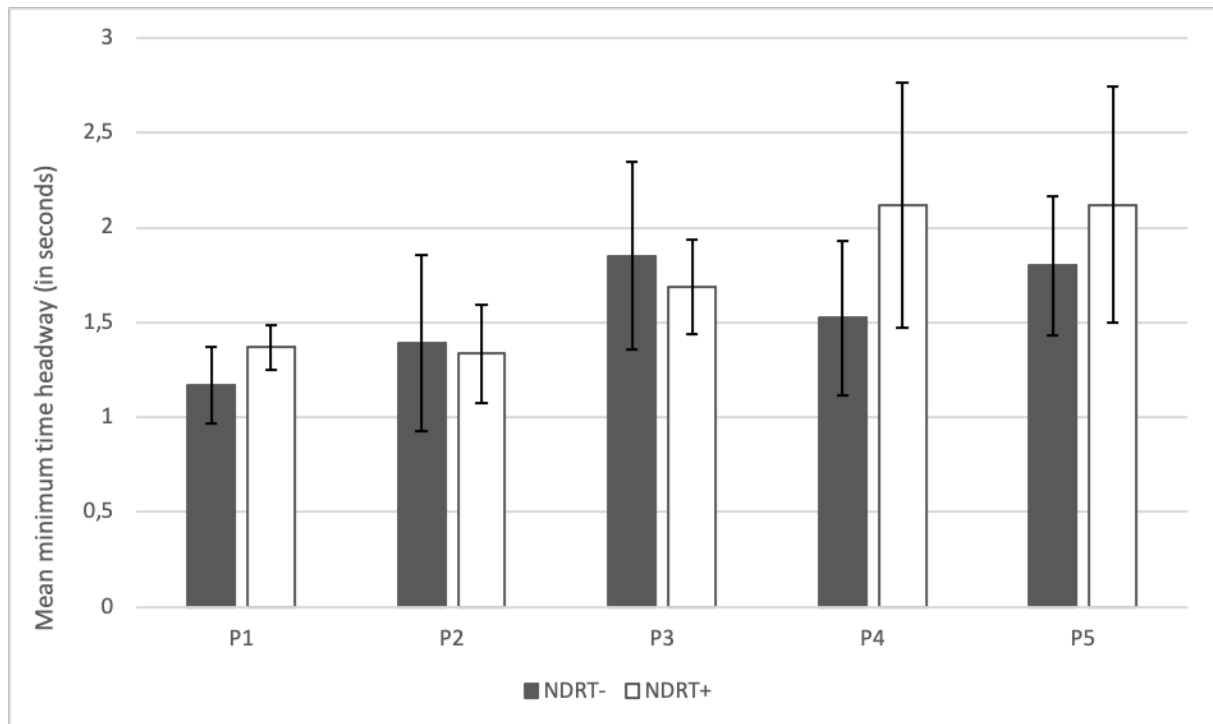


Fig 8. Mean minimum time headway (in seconds) for experts, according to the period (P1, P2, P3, P4 and P5) and the demand of the NDRT (i.e., “NDRT +” corresponds to the high demanding NDRT condition, “NDRT-” to the low demanding one).

Summary of driving behaviours results

To sum it up, the findings on driving behavior indicated a decline in performance at the initial takeover, gradually improving as manual driving resumes. There was a higher instability in the longitudinal control of the vehicle when the followed vehicle initially slowed down compared to other periods. Novices experience more difficulty to takeover compared to experts. Our findings reveal that novices braked more intensely than experts when the followed vehicle decelerates. Notably, experts showed an increase in the minimum distance to the followed vehicle as the takeover progresses, while novices only exhibited this increase 40 to 50 seconds after the takeover (i.e., marginally significant results). Behaviour similar was observed for drivengers in low NDRT conditions, with more intense braking behaviour in the face of deceleration by the vehicle being followed.

The results also showed that novices in low demanding NDRT condition accelerated more than experts or novices in high demanding NDRT condition. More specifically, they accelerated more, and more abruptly in situations where the vehicle being followed was decelerating, where the expected safe behaviour is deceleration and braking. The results also showed that the mean minimum time headway of novices in low demanding NDRT condition increased only at P5, that is between 40 and 50 seconds after the takeover. For experts in both conditions and novices in high demanding NDRT condition, the results showed that the mean minimum time headway increased as soon as P3, that is from 20 to 30 seconds after the takeover.

Visual behaviours

Two types of analyses were conducted for the percentage of dwell time. The first one look at the evolution of the driving task engagement (i.e., fixations made on the driving task areas: road, mirrors, dashboard) during the takeover, by comparing three periods: *TOR1*, corresponding to the 10 seconds before the TOR, *TOR2*, corresponding to the 10 seconds during the TOR, *TOR3*, corresponding to the 10 seconds after the TOR. A 3x2x2 mixed ANOVA (i.e., with the period in within-subject factor, the driving experience and the NDRT demand in between-subject factors) was conducted here. The second type of analyses focused on the evolution of the NDRT engagement (i.e., fixations made on the tablet). Given that participants did not make fixations on the tablet after the takeover, we only compare the periods *TOR1* and *TOR2*. A 2x2x2 mixed ANOVA was therefore conducted on the percentage of dwell time made on the tablet. A 2x2x2 ANOVA was also conducted on the number of switches, with the period in within-subject factor (i.e., *TOR1* vs *TOR2*), the driving experience and the NDRT demand in between-subject factors. We also computed two 2x2 ANOVA on the takeover time (i.e., time of the first fixation made on the driving task areas) during the periods *TOR1* and *TOR2*.

Descriptive statistics for each measure analyzed are presented according to the period (see Table 5).

Table 5

Descriptive statistics (i.e., mean and standard deviation) of the visual behaviour indicators (i.e., percentage of dwell time on the driving task areas and on the NDRT, number of task switches and takeover time), according to the period (i.e., TOR1, TOR2, TOR3).

		TOR1	TOR2	TOR3
% dwell time (driving task areas)	<i>M</i>	48.79	63.96	97.73
	<i>SD</i>	32.71	20.55	4.04
% dwell time (NDRT)	<i>M</i>	43.86	20.17	/
	<i>SD</i>	35.21	17.41	/
Number of task switches	<i>M</i>	1.24	0.61	/
	<i>SD</i>	1.16	0.68	/
Takeover time (in seconds)	<i>M</i>	683.59	2229.64	/
	<i>SD</i>	1504.62	2350.80	/

Concerning the driving task areas, the ANOVA conducted on the percentage of dwell time first indicated a main effect of the period, $F(2, 100) = 81.28$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.62$ (see Table 5). Tukey's post-hoc tests indicated a higher percentage made on the driving task areas during *TOR3* than during *TOR2*, $p < 0.001$, and higher during *TOR2* than during *TOR1*, $p = 0.004$. The ANOVA also indicated an interaction effect between the driving experience and the NDRT demand, $F(1, 50) = 5.87$, $p = 0.019$, $\eta^2 = 0.11$ (see Fig 9). Tukey's post-hoc tests indicated that experts had a higher percentage on the driving task areas than novices when they

were in the high demanding NDRT condition, $p = 0.048$, while no significant difference was shown between novices and experts when they were in the low demanding NDRT condition, *ns*. There was no other significant difference, *ns*.

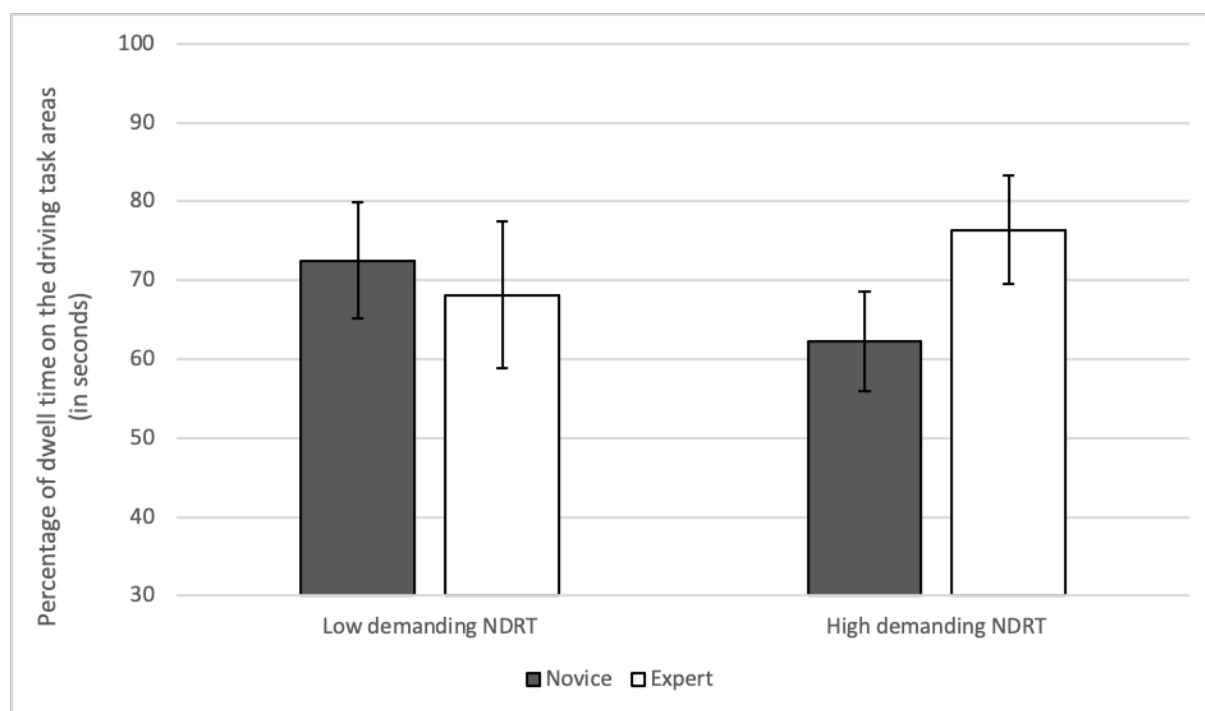


Fig 9. Percentage of dwell time on the driving task areas (in seconds), according to the driving experience (i.e., novice vs expert) and the NDRT demand (i.e., low vs high demanding NDRT).

The ANOVA also highlighted a interaction effect between the period, the NDRT demand and the driving experience, $F(2, 100) = 3.16$, $p = 0.047$, $\eta^2 = 0.06$ (see Fig 10). Post-hoc tests were computed without correction. Analyses first indicated a higher percentage for experts than novices, only when they were in the high demanding NDRT condition, and only for *TOR1* and *TOR2*, $p = 0.034$ and $p = 0.024$, respectively. Post-hoc tests also revealed a higher percentage for experts in the high demanding NDRT condition than for experts in the low demanding one, only for *TOR1*, $p = 0.042$. Finally, the experts in the low demanding NDRT condition increased their percentage of dwell time made on the driving task areas between

TOR1 and *TOR2*, $p = 0.002$, while no significant difference was observed for the other conditions, *ns*. Note that all the experimental conditions increased their percentage of dwell time between *TOR1* and *TOR3* as well as between *TOR2* and *TOR3*, all $p < 0.001$.

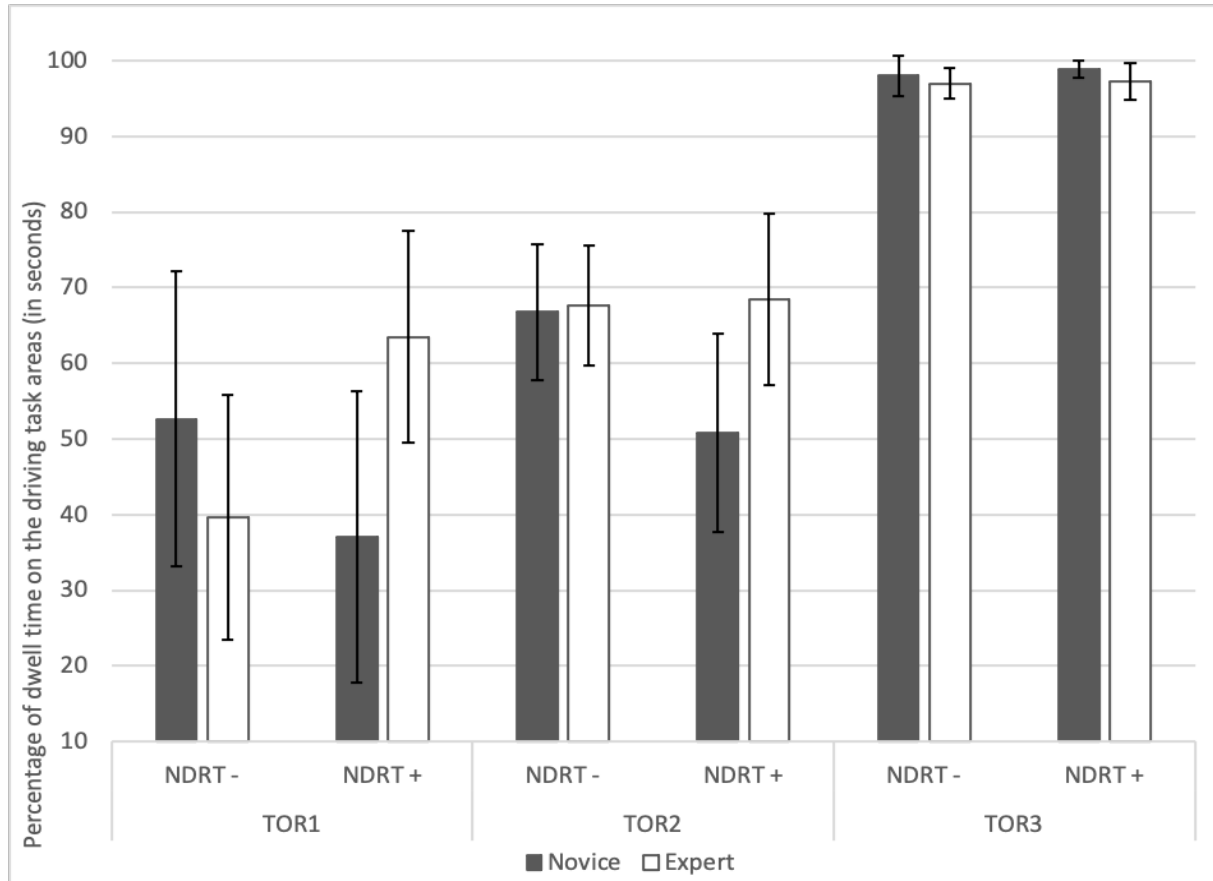


Fig 10. Percentage of dwell time on the driving task areas (in seconds), according to the period (i.e., TOR1, TOR2 and TOR3), the driving experience (i.e., novice vs expert) and the NDRT demand (i.e., low vs high demanding NDRT).

Concerning the NDRT area, the ANOVA indicated a main effect of the period, $F(1, 50) = 27.76$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.36$ (see Table 5), with a higher percentage of dwell time on the tablet during *TOR1* than during *TOR2*. There was no other significant effect, *ns*.

Analyses of the task switching behaviour indicated a main effect of the period, $F(1, 50) = 11.45$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.19$ (see Table 5), with a higher number of switches made between

the two tasks during *TOR1* than *TOR2*. The ANOVA also revealed a marginally significant interaction effect between the period and the NDRT demand, $F(1, 50) = 3.55$, $p = 0.065$, $\eta^2 = 0.07$ (see Fig 11). Post-hoc tests conducted with a Tukey's correction indicated that participants in the high demanding NDRT condition decreased their number of switches made on the two tasks between *TOR1* and *TOR2*, $p = 0.002$, while no significant difference was observed for participants in the low demanding one, *ns*. Post-hoc also highlighted that during *TOR2*, participants in the low demanding NDRT condition made more switches than those in the high demanding one, $p = 0.049$, while no significant difference was observed between the conditions during *TOR1*, *ns*. The ANOVA did not reveal other main or interaction effect, *ns*.

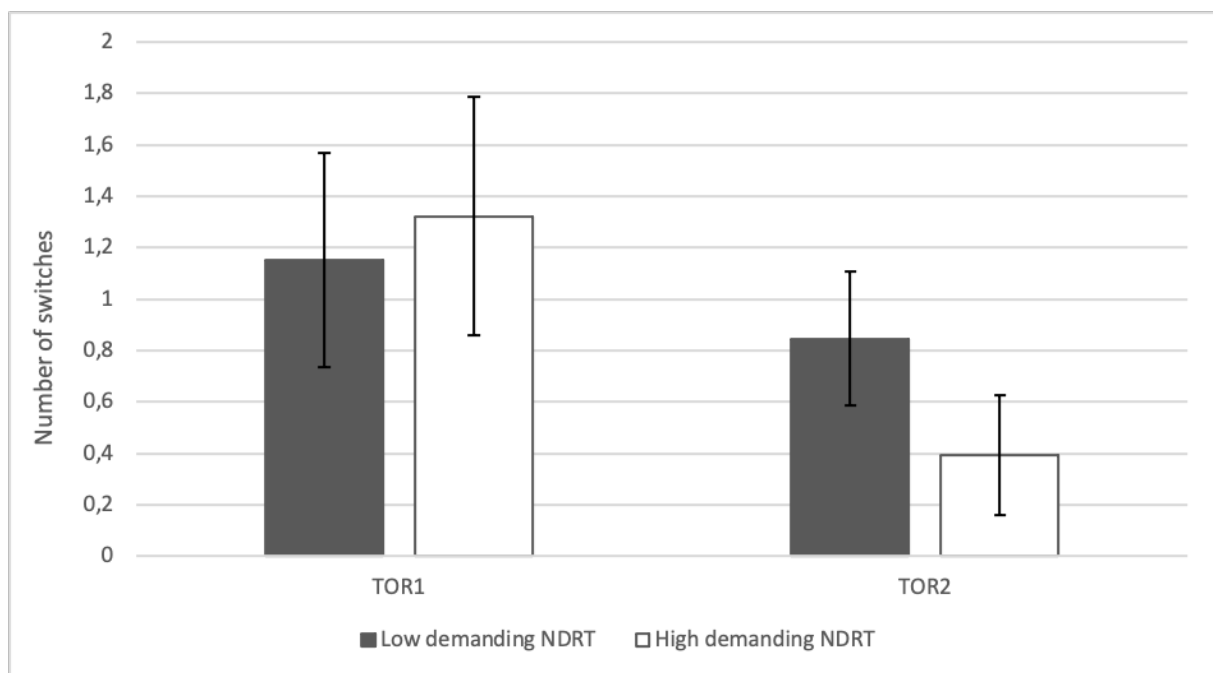


Fig 11. Number of switches made between the driving task areas and the NDRT, according to the period (i.e., TOR 1 and TOR 2) and the NDRT demand (i.e., low vs high demanding NDRT). TOR 3 was not included in the analysis as there was no fixation on the NDRT or switch during this period.

Finally, the two ANOVA's conducted on the takeover time (i.e., time of the first fixation made on the driving scene areas during *TOR1* and *TOR2*) did not indicate any main or interaction effect, *ns*.

Summary of visual behaviours results

The results of the oculometric measurements, relating to the visual-attentional behaviour of the drivengers, showed an increase in engagement within the resumption of the driving task on the one hand, and a decrease in engagement within the NDRT between the automated drive, the TOR and the effective takeover. Although the instruction was to interrupt the NDRT as soon as the TOR alert began, the drivengers continued to engage in the NDRT during the TOR. This is accompanied by a task switching behaviour between the NDRT and the resumption of driving that persists during the TOR. The NDRT was completely interrupted only at the effective takeover.

The results also indicated that the experts in the high demanding NDRT condition were more engaged in the driving task during the automated drive than those in the low demanding NDRT condition. The latter then had to increase their engagement in the driving task between the automated mode and the TOR, which was not observed among the experts in the high demanding NDRT condition. In addition, when they were in the high demanding NDRT condition, the experts were more engaged in the driving task than the novices during the automated drive and the TOR. No difference was observed between experts and novices in the low NDRT condition.

Physiological measure of mental workload: Heart-Rate Variability (HRV)

Three main analyses were conducted on each HRV parameter. The first looked at the comparison of the three driving phases, that is the first period of manual driving (M), the middle of the period of automated driving (A2) and the period of takeover, including the TOR and the 10 first seconds of effective takeover (T1). The second looked at the difference between the beginning (i.e., A1) and the end of the automated drive (A3). Finally, the last analyze focus on the evolution of the HRV parameters through the takeover, that is between four consecutive periods, from the TakeOver Request (TOR) to 1 minutes 10 seconds after the takeover (T1, T2, T3, T4). The description of the eight periods is presented below (see Fig 12). Each period had a duration of 20 seconds. A mixed ANOVA (i.e., with the period in within-subject factor, the driving experience and the NDRT demand in between-subject factors) was conducted on each indicator. Descriptive statistics for each measure analyzed are presented according to the period (see Table 6).

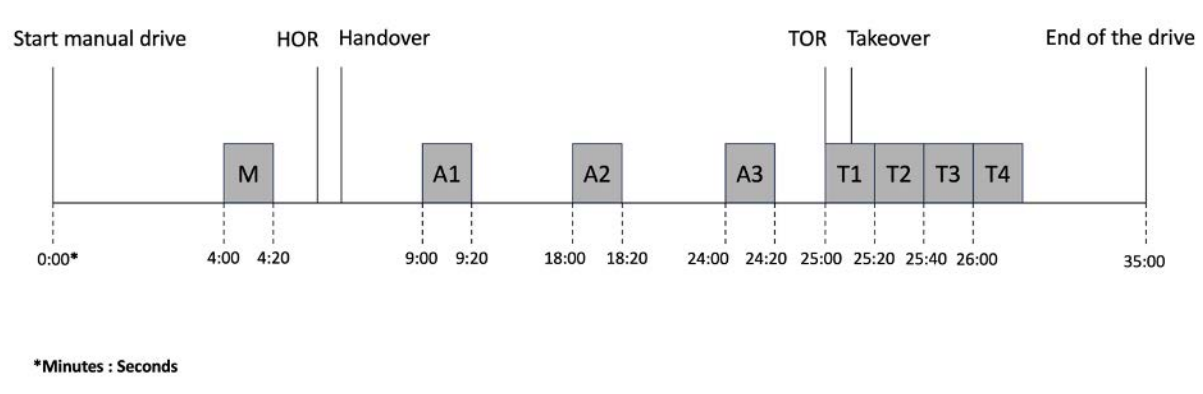


Fig 12. Description of periods of interest used in HRV analyses.

Table 6

Descriptive statistics (i.e., mean and standard deviation) of the Heart-Rate Variability (HRV) indicators (i.e., SDNN and pNN50), according to the period (i.e., M, A1, A2, A3, T1, T2, T3 and T4).

Period	SDNN		pNN50	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
M	35.88	19.62	15.54	17.37
A1	36.75	18.19	19.79	21.96
A2	40.75	22.38	18.07	20.20
A3	38.18	21.08	18.29	21.28
T1	45.63	20.78	16.25	14.63
T2	39.74	22.83	19.26	22.70
T3	39.46	20.63	22.13	19.44
T4	41.93	22.53	23.64	22.95

Concerning the comparison of the manual drive (M), the automated drive (A2) and the takeover (T1), the ANOVA conducted on the SDNN indicator only revealed a marginally significant main effect of the period, $F(2, 84) = 3.01, p = 0.054, \eta^2 = 0.07$ (see Table 6). Tukey's post-hoc test only highlighted that the SDNN was higher during T1 than M, $p = 0.028$, while no difference was found between M and A2 and between A2 and T1, *ns*. No other significant main or interaction effect was found, *ns*.

The ANOVAs conducted on the pNN50 indicator did not reveal any significant main or interaction effect. Analyses conducted on A1 and A3 (i.e., comparison between the beginning and the end of the automated drive) did not reveal any significant effect on each parameter, *ns*.

Concerning the evolution through the takeover (i.e., from T1 to T4), the SDNN analyses highlighted an interaction effect between the period and the NDRT demand, $F(3, 126) = 3.05$, $p = 0.031$, $\eta^2 = 0.07$ (see Fig 13). Post-hoc tests under Tukey did not indicate any significant difference, *ns*. Without correction, post-hoc indicated no differences between the periods for the participants in the low demanding NDRT condition. However, for the participants in the high demanding NDRT condition, analyses showed a higher SDNN during T1 than during T2 and T3, $p = 0.008$ and $p = 0.024$, respectively. Without correction, post-hoc tests also highlighted a higher SDNN for participants in low demanding NDRT condition than for those in the high demanding one, only during T2, $p = 0.039$. No other main or interaction effect was showed, *ns*.

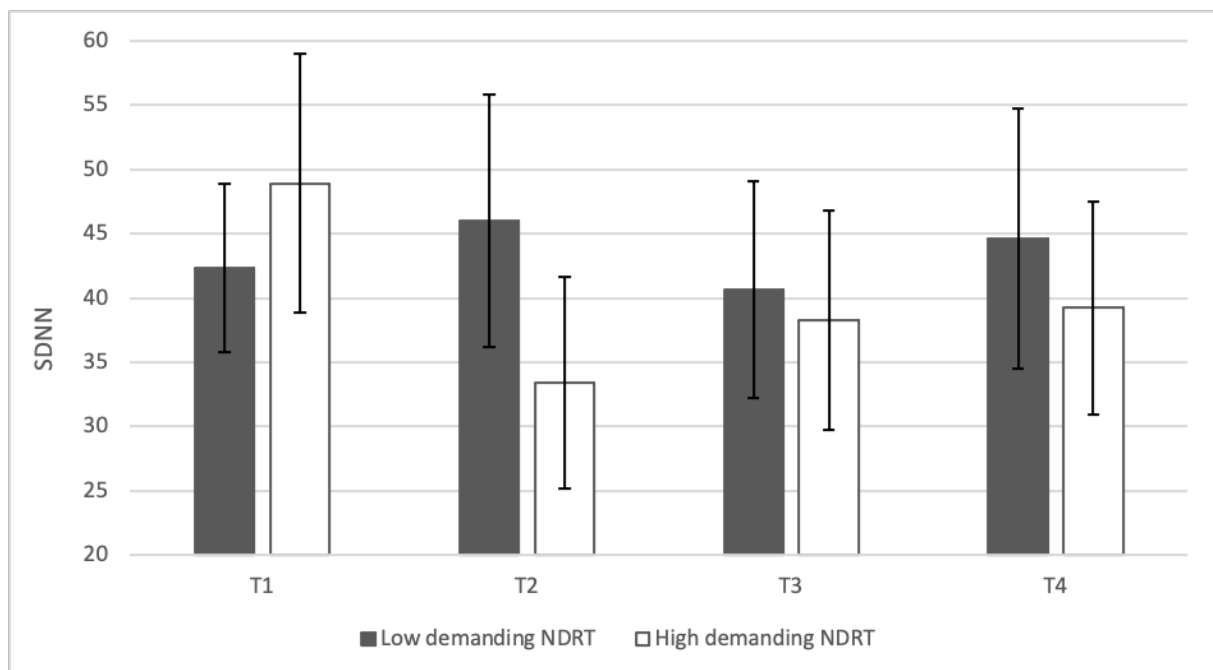


Fig 13. SDNN according to the period (i.e., T1, T2, T3 and T4) and the NDRT demand (i.e., low vs high demanding NDRT).

Finally, the ANOVA conducted on the pNN50 indicator highlighted a main effect of the period, $F(3, 126) = 4.02$, $p = 0.009$, $\eta^2 = 0.09$ (see Table 6). Tukey's post-hoc tests only indicated a lower pNN50 during T1 than during T3 and T4, $p = 0.039$ and $p = 0.022$, respectively. There was no other significant difference, *ns*. The ANOVA also revealed a marginally significant interaction effect between the period and the driving experience, $F(3, 126) = 2.34$, $p = 0.077$, $\eta^2 = 0.05$ (see Fig 14). Post-hoc tests did not reveal any significant difference between the periods for the experts, *ns*. However, for the novices, post-hoc tests indicated an increase of the pNN50 between T1 and T3, $p = 0.041$ without correction, between T1 and T4, $p = 0.001$ without correction and $p = 0.029$ under Tukey, between T2 and T4 as well as between T3 and T4, $p = 0.019$ and $p = 0.014$, respectively. There was also a tendency for novices to have a higher pNN50 than experts during T4, $p = 0.08$ without correction. The ANOVA did not indicate other main or interaction effect, *ns*.

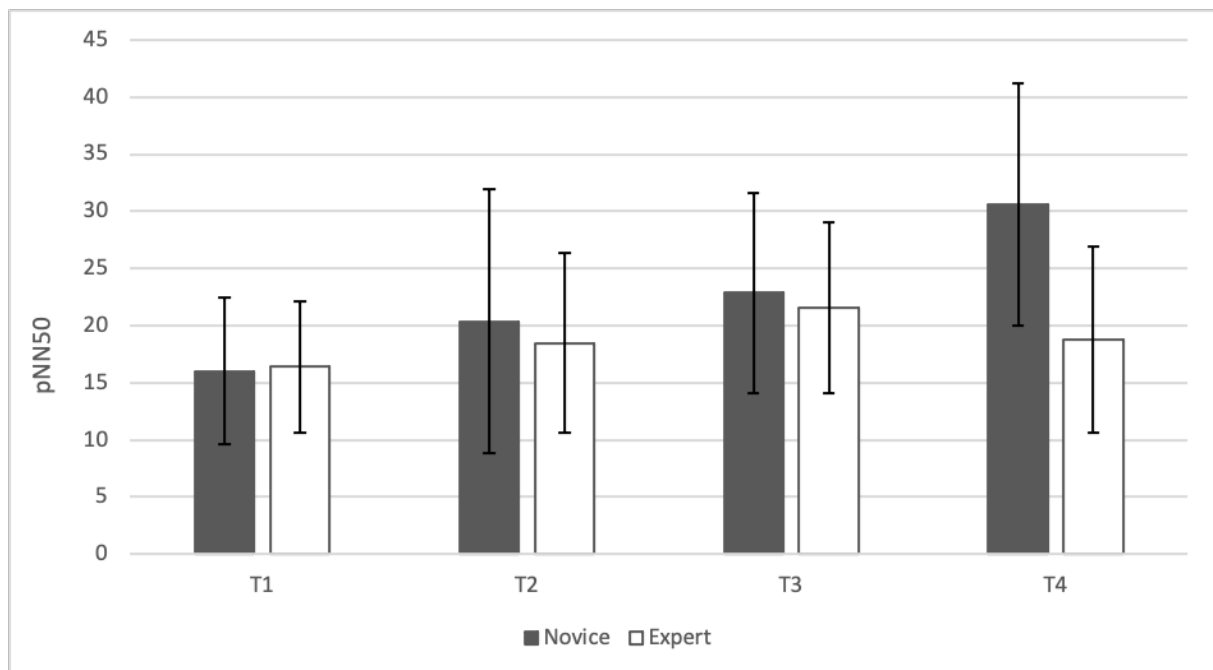


Fig 14. pNN50 according to the period (i.e., T1, T2, T3 and T4) and the level of driving experience (i.e., novice vs expert).

Subjective rating of mental workload: NASA-RTLX

The ANOVA conducted on the NASA-RTLX score did not indicate any main or interaction effect, *ns*. An ANOVA was then conducted on each of the 6 dimensions of the NASA-RTLX. The only dimensions where a significant effect was observed was the frustration. The ANOVA indicated a main effect of the NDRT demand, $F(1, 48) = 4.73$, $p = 0.035$, $\eta^2 = 0.09$, with a higher frustration score for the low demanding NDRT condition ($M = 52.47$, $SD = 5.84$) than for the high demanding one ($M = 34.86$, $SD = 5.61$).

Summary of mental workload results

As shown by the results of heart rate variability, the drivengers' mental workload was higher during the takeover period than during the first phase of manual driving (i.e., not preceded by an automated driving mode) or the automated drive. The results also show a decrease in mental workload as the takeover progressed.

Concerning the driving experience, the results indicate a decrease in the mental workload of novices (pNN50) throughout the takeover period, while that of experts remains stable. There is also a tendency for the mental workload of experts to be greater than that of novices during the period from 10 to 30 seconds after the takeover, including the first deceleration of the vehicle being followed (pNN50).

The results concerning the impact of the NDRT demand on the drivengers' mental workload (SDNN) show that the drivengers in the high demanding NDRT condition managed to increase their mental workload between T1 (TOR period + 10 seconds post-takeover) and T2 (period of 20 seconds consecutive to T1). Their mental load then stabilized over the following periods. In contrast, the drivengers in the low demanding NDRT condition had a comparable level of mental workload between periods. We also observed, only during T2, a greater mental workload among the drivengers in the high demanding NDRT condition than

among those in the low demanding one. It should be noted that the mental workload of the drivengers is equivalent in the two NDRT conditions during the first period (T1).

Discussion

The primary aim of this study was to better understand the deteriorated performances observed among drivengers during takeover, particularly among novices. The second objective was to assess a means to enhance attention and performance of drivengers during takeover. The third objective was to provide further empirical evidence to the MART model, developed by Young and Stanton [20–23]. To address these objectives, this study evaluated to what extent engagement in demanding NDRT (Non-Driving Related Task) enhanced attention and takeover performance of drivengers based on their level of driving experience, compared to less demanding NDRT. Thus, novice and expert participants were immersed in Level 3 automated driving. During the automated mode, they were asked to engage in a tablet-based game NDRT. The games were selected to be either less or highly demanding while involving the same resource pools as the driving task (i.e., visuo-spatial requiring a motor response). Takeover of driving occurred in a highly demanding road situation, i.e., urban road, dense traffic, foggy and rainy weather, and car-following at irregular speed [29]. Visuo-attentional behavior or attention invested in the driving task and NDRT (i.e., visual behavior), mental workload (i.e., heart-rate variability, NASA-RTLX), and driving performance (i.e., driving behaviors) were assessed.

Firstly, we expected novices to experience higher mental workload, visuo-attentional behavior, and degraded performances compared to experts. We anticipated that drivengers engaging in less demanding NDRT would have lower mental workload, visuo-attentional behavior, and more degraded takeover performances than drivengers engaging in demanding NDRT. Under less demanding NDRT conditions, it was expected that novices would have more deteriorated visuo-attentional behavior and performances than experts, while they were

expected to be equivalent under demanding NDRT conditions. Finally, the last hypothesis stipulated equivalent mental workload among novices and experts under less demanding NDRT conditions and higher mental workload among novices than experts under demanding NDRT conditions.

Compared to experts, novices exhibited impaired takeover performances (i.e., greater longitudinal control instability) and more difficulty adapting to changes in the driving situation of car following at an irregular speed pattern (i.e., more intense and unstable braking behavior, poor adaptation to the takeover driving situation as shown by the mean minimum distance). Results also indicated a tendency for experts' mental workload to be higher than that of novices during the period including the first deceleration of the followed vehicle. It seemed that experts managed to maintain their mental workload at a constant level during the takeover, while novices' mental workload decreased during the first minute of takeover. The first hypothesis is partially validated. While we expected a higher mental workload among novices, the results indicated a higher mental workload among experts. The lower amount of attentional resources mobilized by novices compared to experts can be explained by a more impaired situation awareness among novices [69], particularly their low ability to predict risks in the road environment [70]. Due to their better risk awareness, experts were able to mobilize a constant level of resources throughout the takeover. Additionally, the relative demand on driving activity is higher among novices than among experts, as they have not yet automated the operational level of driving activity, such as vehicle control [29,47–49]. Thus, the greater gap between their mobilized resources (lower than experts) and those required by the task (higher than experts) would be the cause of the deteriorated performances observed among novices. Taking over the wheel after an automated journey appears to be a particularly risky task for drivers with a low level of driving experience, confirming our hypothesis.

Our hypothesis regarding the demand of the NDRT conducted during the automated mode is also validated concerning the results related to mental workload and takeover performances. Firstly, engagement in a demanding NDRT allowed drivengers to increase their mental workload during the first 30 seconds of the takeover. In contrast, drivengers engaging in a less demanding NDRT failed to increase their mental workload during the takeover period, resulting in a lower workload than those in the demanding NDRT condition and deteriorated takeover performances (i.e., more abrupt and unstable braking, underlying more difficulties in reacting to decelerations of the followed vehicle). These results thus provide new empirical evidence in favor of the MART model of malleable attentional resources [20–23]. Indeed, engagement in a demanding NDRT helped maintain drivengers' attentional capacities at an optimal level, allowing them to increase their mental workload to meet the high demands of the takeover and maintain optimal driving performance. In contrast, drivengers engaging in a less demanding NDRT failed to adjust their mental workload, resulting in a less significant workload and deteriorated performances compared to drivengers in the demanding NDRT condition. These findings thus support the existence of malleability of attentional capacities, predicting a degradation of performance in case of overload or underload of resource tanks.

Our hypothesis regarding the interaction effect between NDRT demand and driving experience is validated (see Fig 15). Indeed, NDRT demand differently affected the performances of novices and experts. The results showed that engaging in a low-demanding NDRT deteriorated takeover performances among novices, as observed by poor adaptation to the car-following situation at irregular speed (i.e., inappropriate acceleration when the followed vehicle was decelerating, mean minimum time headway only increasing to a minimum of 40 seconds after the takeover, compared with 20 seconds for other conditions). For the first time, this study highlighted the malleability of attentional resources and how it manifested according to individual capacities, here according to their level of driving experience. Performing a less

demanding NDRT during the automated mode deteriorated certain aspects of driving tasks, only among novices (i.e., acceleration and time headway). They thus experienced difficulties in forming an optimal situational awareness allowing them to adapt their behaviors to changes occurring in the road situation (i.e., acceleration and deceleration of the followed vehicle). These inappropriate behaviors could lead them to a road accident in a critical road situation, for example, if the followed vehicle brakes suddenly to avoid an obstacle. According to MART, the underload state induced by the less demanding NDRT conducted during the automated mode will temporarily reduce available attentional capacities. Upon the occurrence of the takeover, task demand suddenly increases. The difference between the amount of attentional resources available at that moment and the task demand (here, the resumption of driving) would then predict the magnitude of performance degradation. Thus, the greater gap between available resources and task demand among novices, compared to experts, would explain the particularly deteriorated takeover performances observed among novices in the less demanding NDRT condition. They also required twice as much time as other conditions to adapt their driving behaviors to the complex situation of following a vehicle at irregular speed (i.e., 40 seconds for the mean minimum time headway to stabilize compared to 20 seconds for other conditions). This additional adaptation time needed appears to be the consequence of the adaptation of attentional resources, restricted by the less demanding NDRT, to the more significant demand of the driving task than for experts. In contrast, performing a demanding NDRT allowed novice and expert drivers to maintain their attentional capacities at an optimal level and thus preserve their driving performances.

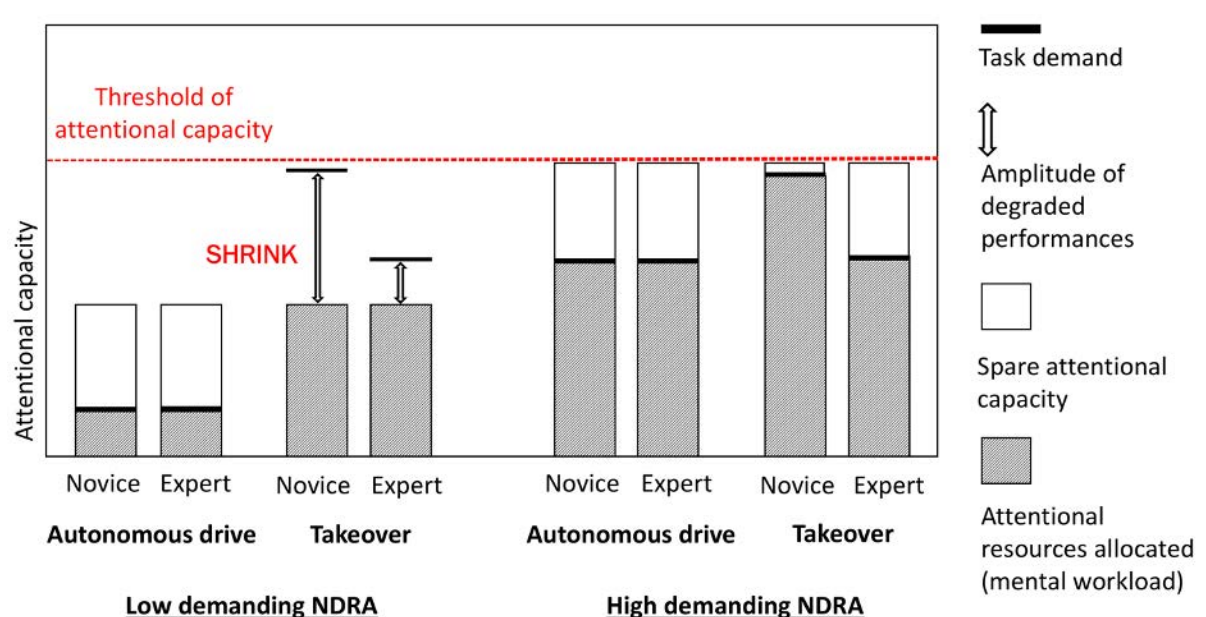


Fig 15. Prediction of the amplitude of performance deterioration during takeover, according to the level of driving experience of the drivengers and the NDRT demand.

Finally, our hypothesis regarding the impact of NDRT demand according to the level of driving experience on their visuo-attentional behavior is partially confirmed. Indeed, engaging in a less demanding NDRT deteriorated novices' visuo-attentional behavior more than that of experts. On the other hand, engaging in a demanding NDRT resulted in equivalent visuo-attentional behavior among novices and experts. Specifically, experts in the demanding NDRT condition managed to invest more resources in the driving task during the automated mode and the alert than novices. During the automated mode, experts in the less demanding NDRT condition had visuo-attentional behavior comparable to novices. However, experts managed to increase their engagement in the driving task upon the occurrence of the alert, while novices increased their engagement only during the actual resumption of driving. It is also noteworthy that engagement in the NDRT was equivalent during each period and for each experimental condition. Although all drivengers reduced their engagement in the NDRT upon the occurrence of the alert, it was interrupted only upon the actual resumption of driving. Thus, novices'

inability to increase their engagement in the driving task upon the occurrence of the alert can be explained by the greater demand of the driving task than for experts, and thus by their lack of available resources. Upon actual resumption, novices then managed to increase their engagement in the driving task as they no longer invested attentional resources in the NDRT. In contrast, the greater quantity of available resources among experts allowed them, in the less demanding NDRT condition, to increase their engagement in the driving task upon the occurrence of the alert, reaching a level equivalent to that of experts in the demanding NDRT condition. However, they could not invest as many resources in the driving task during the automated mode as experts in the demanding NDRT condition. Here, the malleability of attentional resources [20–23] can explain this difference. In conclusion, performing a demanding NDRT helped maintain drivengers' attentional capacities at an optimal level, but only experts' visuo-attentional behavior was positively impacted. In contrast, novices had deteriorated visuo-attentional behavior during the automated mode and the alert, regardless of the NDRT demand.

This study highlighted the negative impact of performing a less demanding NDRT during the automated mode on drivengers' capacities, especially novices, to resume driving in a complex road situation. Although the instruction was to interrupt the NDRT at the beginning of the alert, drivengers failed to disengage from it before the actual resumption of driving. Since both driving and NDRT tasks are primarily visual tasks with motor responses, continuing the NDRT during the alert or preparation period implies switching behaviors. The cost of this switch [31] contributes to reducing the quantity of available attentional resources, and thus the quantity of resources to invest in resuming the driving task. This can be problematic for drivengers engaging in a less demanding NDRT, as they do not have enough resources to effectively meet the task requirements and thus resume driving safely. This can also be problematic for novices, as the driving task is more demanding than for experts, thus requiring

more attentional resources. Future research should investigate to what extent actual interruption of the NDRT at the beginning of the alert could enhance takeover performances and adaptation time to the road situation of drivengers, especially novices engaging in a less demanding NDRT during the automated mode. It would also be relevant to assess the impact of NDRT demand on the performances of novice and expert drivengers depending on the exigency and criticality of the road situation encountered during the resumption.

It is crucial to prevent and raise awareness among current and future users of automated vehicles about the dangers associated with the nature of their activities when the vehicle is driving autonomously. As part of road code learning, it could be recommended to interrupt any activity at the beginning of the alert. Recommendations regarding the nature of NDRT conducted during the automated mode could also be provided, especially on the importance of staying active and preferring sufficiently demanding activities, of a visual nature and involving motor response, such as logic and puzzle games on tablets or smartphones. This study also showed the importance of studying novices' behavior in a Level 3 automated driving context. Indeed, tomorrow's drivengers may never reach a sufficient level of driving experience to implement safe behaviors, especially during the resumption of driving. It is thus even more necessary to prevent the emerging risks of this new technology by conducting prevention campaigns, developing learning programs, and evaluating and developing takeover aids to limit the risks involved in driving an automated vehicle.

Conclusion

The current study has contributed new empirical evidence to the MART model of malleable attentional resources, developed by Young and Stanton since 2002 [20–23]. The findings have shown that engagement in a demanding NDRT, utilizing the same resources as the driving task, helped maintain the drivengers' attentional resources at an optimal level. Drivengers then had

better situational awareness and safer behaviors when they had to resume driving after 20 minutes of Level 3 automated driving. Engagement in low demanding NDRT was particularly detrimental to the performance of novices. This can be explained by the larger gap between their attentional capabilities and the task demand, which was higher than for the experts.

Acknowledgements

We would like to thank the participants who took part in this study, as well as the MSHS-T (Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse) for allowing this study to be conducted at the CCU (Cognition Comportement et Usages) platform.

References

1. Heikoop DD, de Winter JCF, van Arem B, Stanton NA. Psychological constructs in driving automation: a consensus model and critical comment on construct proliferation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2016 May 3;17(3):284–303.
2. Klauer C, Dingus TA, Neale VL, Sudweeks JD, Ramsey DJ. The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data. 2006;
3. Sivak M. The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception*. 1996;25(9):1081–9.
4. Underwood G, Chapman P, Crundall D. Experience and visual attention in driving. *Human factors of visual and cognitive performance in driving*. 2009;89–116.
5. Dingus TA, Klauer SG, Neale VL, Petersen A, Lee SE, Sudweeks J, et al. The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety ...; 2006.
6. Lemerrier C, Cellier JM. Les défauts de l'attention en conduite automobile : inattention, distraction et interférence: *Le travail humain*. 2008 Sep 18;Vol. 71(3):271–96.
7. Singh S. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey. 2015.
8. Young K, Regan M. Driver distraction: A review of the literature. 2007;29.
9. Society of Automotive Engineers (SAE). Taxonomy and Definitions for terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. 2021;

10. Merat N, Jamson AH. How Do Drivers Behave in a Highly Automated Car? In: Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : Driving Assessment 2009 [Internet]. Big Sky, Montana, USA>: University of Iowa; 2009 [cited 2022 Aug 18]. p. 514–21. Available from: <http://pubs.lib.uiowa.edu/driving/article/id/28077/>
11. Navarro J. A state of science on highly automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2019 May 4;20(3):366–96.
12. Shen S, Neyens DM. Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks. *Journal of Safety Research*. 2017 Jun;61:149–55.
13. Strand N, Nilsson J, Karlsson ICM, Nilsson L. Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2014 Nov;27:218–28.
14. Merat N, Seppelt B, Louw T, Engström J, Lee JD, Johansson E, et al. The “Out-of-the-Loop” concept in automated driving: proposed definition, measures and implications. *Cogn Tech Work*. 2019 Feb;21(1):87–98.
15. Louw T, Markkula G, Boer E, Madigan R, Carsten O, Merat N. Coming back into the loop: Drivers' perceptual-motor performance in critical events after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*. 2017 Nov;108:9–18.
16. Zeeb K, Buchner A, Schrauf M. What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*. 2015 May;78:212–21.

17. Endsley MR. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*. 1995;37(1):32–64.
18. Lu Z, Coster X, de Winter J. How much time do drivers need to obtain situation awareness? A laboratory-based study of automated driving. *Applied Ergonomics*. 2017 Apr;60:293–304.
19. Vlakveld W, van Nes N, de Bruin J, Vissers L, van der Kroft M. Situation awareness increases when drivers have more time to take over the wheel in a Level 3 automated car: A simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2018 Oct;58:917–29.
20. Young MS, Stanton NA. Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2002 Jan;3(2):178–94.
21. Young MS, Stanton NA. Malleable Attentional Resources Theory: A New Explanation for the Effects of Mental Underload on Performance. *Hum Factors*. 2002 Sep;44(3):365–75.
22. Young MS, Stanton NA. What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*. 2007 Aug;50(8):1324–39.
23. Young MS, Stanton NA. The Decay of Malleable Attentional Resources Theory. In: Bust PD, editor. *Contemporary Ergonomics 2006* [Internet]. 1st ed. Taylor & Francis; 2020 [cited 2022 Aug 18]. p. 253–7. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781000117073/chapters/10.1201/9781003072072-61>

24. Backs RW, Seljos KA. Metabolic and cardiorespiratory measures of mental effort: the effects of level of difficulty in a working memory task. *International journal of psychophysiology*. 1994;16(1):57–68.
25. Galy E, Cariou M, Mélan C. What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International journal of psychophysiology*. 2012;83(3):269–75.
26. Inzana CM, Driskell JE, Salas E, Johnston JH. Effects of preparatory information on enhancing performance under stress. *Journal of Applied Psychology*. 1996;81(4):429.
27. Matthews G, Desmond PA. Stress as a factor in the design of in-car driving enhancement systems. *Le Travail Humain*. 1995;58(2):109–29.
28. Monod H, Kapitaniak B. *Ergonomie* (2ème édition). Elsevier/Masson; 2003.
29. Paxion J, Galy E, Berthelon C. Overload depending on driving experience and situation complexity: Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*. 2015 Nov;51:343–9.
30. Merat N, Jamson AH, Lai FCH, Carsten O. Highly Automated Driving, Secondary Task Performance, and Driver State. *Hum Factors*. 2012 Oct;54(5):762–71.
31. Monsell S. Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*. 2003 Mar;7(3):134–40.
32. Recarte MA, Nunes LM. Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*. 2003;9(2):119–37.
33. de Winter JCF, Happee R, Martens MH, Stanton NA. Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the

- empirical evidence. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2014 Nov;27:196–217.
34. Young MS, Stanton NA. Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2002 Jan;3(2):178–94.
35. Wandtner B, Schömig N, Schmidt G. Effects of Non-Driving Related Task Modalities on Takeover Performance in Highly Automated Driving. *Hum Factors*. 2018 Sep;60(6):870–81.
36. Yoon SH, Ji YG. Non-driving-related tasks, workload, and takeover performance in highly automated driving contexts. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2019 Jan;60:620–31.
37. Lee SC, Yoon SH, Ji YG. Effects of Non-Driving-Related Task Attributes on Takeover Quality in Automated Vehicles. *International Journal of Human–Computer Interaction*. 2021 Feb 7;37(3):211–9.
38. Pampel SM, Large DR, Burnett G, Matthias R, Thompson S, Skrypchuk L. Getting the driver back into the loop: the quality of manual vehicle control following long and short non-critical transfer-of-control requests: TI:NS. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*. 2019 May 4;20(3):265–83.
39. Yoon SH, Ji YG. Non-driving-related tasks, workload, and takeover performance in highly automated driving contexts. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2019 Jan;60:620–31.

40. Gold C, Körber M, Lechner D, Bengler K. Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: The role of traffic density. *Human factors*. 2016;58(4):642–52.
41. Radlmayr J, Gold C, Lorenz L, Farid M, Bengler K. 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*. 2014 Sep;58(1):2063–7.
42. Wickens CD. Multiple Resources and Mental Workload. *Hum Factors*. 2008 Jun;50(3):449–55.
43. Wandtner B, Schömig N, Schmidt G. Secondary task engagement and disengagement in the context of highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2018 Oct;58:253–63.
44. Roche F, Somieski A, Brandenburg S. Behavioral changes to repeated takeovers in highly automated driving: effects of the takeover-request design and the nondriving-related task modality. *Human factors*. 2019;61(5):839–49.
45. Samuel S, Borowsky A, Zilberstein S, Fisher DL. Minimum Time to Situation Awareness in Scenarios Involving Transfer of Control from an Automated Driving Suite. *Transportation Research Record*. 2016 Jan;2602(1):115–20.
46. Wright TJ, Samuel S, Borowsky A, Zilberstein S, Fisher DL. 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*. 2016 Sep;60(1):270–3.

47. Michon JA. A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In: Evans L, Schwing RC, editors. Human Behavior and Traffic Safety [Internet]. Boston, MA: Springer US; 1985 [cited 2022 Aug 18]. p. 485–524. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
48. Schneider W, Shiffrin RM. Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*. 1977;84(1):1.
49. Shiffrin RM, Schneider W. Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*. 1977;84(2):127.
50. Heikoop DD, de Winter JCF, van Arem B, Stanton NA. Effects of mental demands on situation awareness during platooning: A driving simulator study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2018 Oct;58:193–209.
51. Falkmer T, Gregersen NP. A Comparison of Eye Movement Behavior of Inexperienced and Experienced Drivers in Real Traffic Environments: *Optometry and Vision Science*. 2005 Aug;82(8):732–9.
52. Gershon P, Sita KR, Zhu C, Ehsani JP, Klauer SG, Dingus TA, et al. Distracted driving, visual inattention, and crash risk among teenage drivers. *American journal of preventive medicine*. 2019;56(4):494–500.
53. McGwin Jr G, Brown DB. Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis & Prevention*. 1999;31(3):181–98.
54. Hancock PA. Automation: how much is too much? *Ergonomics*. 2014;57(3):449–54.

55. Vlakveld W. Transition of control in highly automated vehicles: A literature review. 2015;
56. Ünal AB, Steg L, Epstude K. The influence of music on mental effort and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*. 2012;48:271–8.
57. Byers JC, Bittner AC, Hill SG. Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary. *Advances in industrial ergonomics and safety*. 1989;1:481–5.
58. Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: *Advances in psychology*. Elsevier; 1988. p. 139–83.
59. Eyraud R, Zibetti E, Baccino T. Allocation of visual attention while driving with simulated augmented reality. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2015 Jul;32:46–55.
60. Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health*. 2017;5:290215.
61. Charles RL, Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied Ergonomics*. 2019 Jan;74:221–32.
62. Haapalainen E, Kim S, Forlizzi JF, Dey AK. Psycho-physiological measures for assessing cognitive load. In: *Proceedings of the 12th ACM international conference on Ubiquitous computing*. 2010. p. 301–10.

63. Cegarra J, Morgado N. Étude des propriétés de la version francophone du NASATLX. In: EPIQUE 2009: 5ème Colloque de Psychologie Ergonomique. Nice France; 2009. p. 233–9.
64. Procci K, Bowers CA, Jentsch F, Sims VK, McDaniel R. The revised game engagement model: capturing the subjective gameplay experience. *Entertainment Computing*. 2018;27:157–69.
65. Brockmyer JH, Fox CM, Curtiss KA, McBroom E, Burkhart KM, Pidruzny JN. The development of the Game Engagement Questionnaire: A measure of engagement in video game-playing. *Journal of experimental social psychology*. 2009;45(4):624–34.
66. Davis FD. Technology acceptance model: TAM. Al-Suqri, MN, Al-Aufi, AS: *Information Seeking Behavior and Technology Adoption*. 1989;205:219.
67. O'Brien HL, Cairns P, Hall M. A practical approach to measuring user engagement with the refined user engagement scale (UES) and new UES short form. *International Journal of Human-Computer Studies*. 2018;112:28–39.
68. Witmer BG, Jerome CJ, Singer MJ. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*. 2005;14(3):298–312.
69. Endsley MR. Expertise and situation awareness. *The Cambridge handbook of expertise and expert performance*. 2006;633–51.
70. Pradhan AK, Hammel KR, DeRamus R, Pollatsek A, Noyce DA, Fisher DL. Using Eye Movements To Evaluate Effects of Driver Age on Risk Perception in a Driving Simulator. *Hum Factors*. 2005 Dec;47(4):840–52.

Supporting informations

S1 Appendix. Game Engagement and Appreciation Questionnaire. The questionnaire is presented in its French and English versions. For each item, the evaluated dimension is indicated, as well as the questionnaire from which it is taken.

S1 File. Conditions code. The codes used for the two experimental conditions are described.

S2 File. Acceleration data. Data for the mean and mean standard deviation amplitude of acceleration.

S3 File. Brake data. Data for the mean and mean standard deviation amplitude of brake.

S4 File. Distance data. Data for the mean minimum distance.

S5 File. Time-headway data. Data for the mean minimum time headway.

S6 File. Visual behaviour data. Data for the mean percent of dwell time.

S7 File. Switch behaviour data. Data for the mean number of switches.

S8 File. Heart-Rate Variability Data. Data for the SDNN and pNN50 indicators by period of interest.

S9 File. NASA-RTLX data. Data for the NASA-RTLX assessment of subjectif mental workload.

4. Les points clés sur le chapitre 4

- Notre dernière étude a pour objectif d'évaluer le modèle MART des ressources attentionnelles malléables, en investiguant dans quelle mesure l'engagement au sein d'une tâche annexe exigeante peut permettre de préserver les performances de reprise chez les drivengers novices et experts.
- 68 novices ou experts réalisaient des tâches annexes peu ou très exigeantes lorsque le mode automatisé était activé sur simulateur de conduite. La reprise de la conduite survenait dans une situation routière très complexe.
- Le comportement visuo-attentionnel, la charge mentale et les performances de reprise étaient évaluées avec des mesures oculométriques, des mesures cardiaques et des mesures comportementales, respectivement.
- Les résultats valident le modèle MART, mettant en évidence de meilleures performances de reprise chez les drivengers réalisant une NDRT exigeante en comparaison avec ceux réalisant une NDRT peu exigeante.
- L'engagement au sein d'une NDRT peu exigeante détériore particulièrement le comportement visuo-attentionnel et les performances des novices, ce qui est expliqué par le plus grand écart entre leurs ressources attentionnelles disponibles, rétrécies par la sous-charge mentale, et la demande plus élevée de la tâche de conduite que chez les experts.
- La prise en compte du caractère dynamique et malléables des ressources attentionnelles apparaît cruciale dans la conception des modèles de l'attention en psychologie cognitive.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Notre discussion générale articule quatre parties. La première sera consacrée au rappel des actions de recherche et des résultats principaux obtenus pour les quatre études menées. Dans la deuxième partie, nous discuterons de notre contribution théorique en ce qui concerne la reprise de l'activité de conduite et les facteurs pouvant l'impacter d'une part, et sur la validation du modèle MART d'autre part. La troisième partie sera consacrée à notre contribution méthodologique dans l'étude des facteurs impactant la reprise de l'activité de conduite. Dans une dernière partie, nous présenterons les perspectives de cette thèse, tant au point de vue applicatif que de recherche.

1. Objectifs, actions de recherche et résultats principaux

L'objectif général poursuivi par l'ensemble des travaux menés dans le cadre de cette thèse était de mieux comprendre les processus psychologiques intervenant dans l'activité de conduite automatisée de niveau 3 et les causes des comportements détériorés lors de la reprise. Ces travaux s'inscrivaient ainsi dans une perspective de prévention des risques émergents de cette nouvelle technologie. Afin d'y répondre, trois actions de recherche ont été menées. La première, théorique, a permis d'approfondir notre compréhension des processus attentionnels impliqués dans l'activité de reprise de la conduite et les causes des comportements dégradés répertoriés dans la littérature. Cette revue de la littérature a identifié le modèle MART (Young and Stanton, 2002a, b, 2007, 2020) comme modèle le plus adapté à la situation inédite de reprise de l'activité de conduite. La deuxième action a étudié la façon dont le niveau d'expertise routière (facteur interne au sujet) et la demande relative à la Non-Driving-Related Task (NDRT, facteur externe) influent sur la capacité à reprendre la conduite. Enfin, notre troisième action a permis

la formulation de recommandations visant à prévenir les risques associés à la reprise, notamment en évaluant l'impact de la demande relative à la NDRT menée durant le mode automatisé.

Quatre études expérimentales ont été menées. La première étude, utilisant la méthode par scénarios d'Anderson, a étudié l'impact de 3 facteurs (situationnels : durée du mode de conduite automatisé, densité du trafic ; liés à la NDRT : jouer à un jeu sur tablette, écouter de la musique, discuter avec un passager) sur l'estimation de la difficulté de la reprise de la conduite manuelle par des conducteurs. Les facteurs sélectionnés étaient identifiés dans la littérature comme déterminant le comportement de conduite et de reprise de la conduite manuelle. Les résultats ont permis de confirmer l'importance de ces facteurs : la densité du trafic impacte davantage la difficulté perçue de la reprise que la durée du mode automatisé. La nature de la NDRT module également la difficulté perçue de reprendre la conduite manuelle, l'activité de jeu sur tablette engendrant le niveau de difficulté perçue le plus important. La combinaison de la présence des facteurs situationnels dégradés et relatifs à la tâche augmente la difficulté de la reprise. Les analyses ont finalement permis d'identifier trois profils de conducteurs en fonction de l'impact relatif des facteurs manipulés sur l'estimation de la difficulté perçue à reprendre la conduite manuelle : les « réticents à la reprise », les « adaptifs » et les « confiants ». Les conducteurs ayant un profil « réticent » (représentant 19% de notre échantillon) estiment la reprise de la conduite manuelle comme très difficile quel que soit le contexte, et ne perçoivent aucun effet de la présence des facteurs manipulés. Les conducteurs ayant un profil « confiant » (représentant 33% de notre échantillon) estiment la reprise de la conduite manuelle comme peu difficile, quel que soit le contexte. Leur perception est cependant modulée par la présence des facteurs manipulés, bien que la reprise soit toujours considérée comme peu difficile dans les contextes les plus défavorables (i.e., reprise après un trajet automatisé long, dans une situation routière à trafic dense, tout en écoutant de la musique,

discutant avec un passager et jouant à un jeu sur tablette). Finalement, les conducteurs ayant un profil « adaptatif » (représentant 48% de notre échantillon) estiment la reprise de la conduite manuelle comme très difficile dans les contextes de reprise défavorable, et l'estiment comme facile dans les contextes de conduite plus favorable (par exemple, lors de la reprise après un trajet automatisé court, dans une situation routière à trafic peu dense et sans la présence de NDRT). Sur la totalité de notre échantillon, la moitié des individus ont montré une perception inadéquate de la difficulté à reprendre la conduite (i.e., profils « confiants » et « réticents ») pouvant révéler une future utilisation problématique des véhicules automatisés.

Les trois dernières études de cette thèse intéressaient le comportement du drivenger dans le cadre de scénarios programmés sur simulateur de conduite dynamique. Nous nous sommes ici intéressés à trois périodes : (1) la période de reprise effective de la conduite, (2) la période de conduite en mode automatisé et (3) la période de préparation à la reprise, c'est-à-dire la période allant du début de l'alerte ou TakeOver Request (TOR) jusqu'à la reprise effective de la conduite manuelle. Ce parti pris, et nous y reviendrons dans le cadre de la partie portant sur notre contribution méthodologique, est une originalité au regard des travaux menés classiquement sur la conduite autonome. En effet, la majorité des études s'intéresse davantage à la période de reprise effective de la conduite, c'est-à-dire aux comportements et performances du drivenger à partir du moment où il a repris l'activité de conduite manuelle. La conduite étant une activité majoritaire visuo-attentionnelle, reprendre le volant après un trajet automatisé nécessite une réorientation de l'attention. Le drivenger doit alors se désengager visuo-attentionnellement de la NDRT menée durant le mode automatisé afin de s'engager visuo-attentionnellement dans la tâche de conduite manuelle. L'évaluation de l'état physiologique et des comportements du drivenger en amont de la reprise apparaît donc cruciale afin de mieux comprendre les difficultés liées à la reprise de la conduite manuelle par l'humain derrière le volant.

Les études 2 et 3 intéressaient particulièrement le comportement visuo-attentionnel des drivengers lors de cette période de préparation à la reprise. Dans cet objectif, les mesures oculométriques, et notamment le dwell time ou temps de fixations, ont été utilisées en tant qu'indicateur de l'engagement attentionnel au sein de la modalité visuelle de la tâche de conduite. Ainsi, un temps plus important passé à fixer les zones relatives à la tâche de conduite est associé à un plus grand investissement de ressources attentionnelles au sein de la reprise de la tâche de conduite. Plus précisément, l'étude 2 avait pour objectif d'évaluer l'effet du niveau d'expertise routière (i.e., novice vs expert) et du niveau d'automatisation (i.e., niveau 0 vs niveau 3) sur le comportement visuo-attentionnel (i.e., mesures oculométriques) et la charge mentale (i.e., diamètre pupillaire) des individus. La période analysée correspondait pour les drivengers (i.e., niveau 3) à la période de préparation à la reprise. La même situation routière était analysée chez les conducteurs (i.e., niveau 0), période durant laquelle ils conduisaient manuellement. Les résultats indiquent que le diamètre pupillaire des drivengers s'avère significativement plus important que celui des conducteurs, révélant une charge mentale plus importante chez les drivengers que chez les conducteurs (Beatty, 1982; Hess & Polt, 1964; Kahneman, 1973). Par ailleurs, leur comportement visuo-attentionnel s'avère détérioré par rapport aux conducteurs (i.e., fixations moins fréquentes et de plus courte durée sur les aires d'intérêts relatives à la tâche de conduite, c'est-à-dire la scène routière, les rétroviseurs et le tableau de bord). Concernant l'effet de l'expertise routière, les résultats montrent que les drivengers novices ont un comportement visuo-attentionnel particulièrement détérioré en comparaison aux conducteurs novices et experts et aux drivengers experts (i.e., moins de temps passé à fixer les zones relatives à la tâche de conduite). Notons que les résultats n'indiquent pas de différence significative entre les drivengers novices et experts en ce qui concerne le temps passé à fixer la tablette (i.e., NDRT). Cette deuxième étude a permis de mettre en évidence le comportement visuo-attentionnel détérioré chez les drivengers lorsqu'ils doivent se préparer à

reprandre la conduite, et en particulier chez les novices, en comparaison à leurs homologues en condition de conduite manuelle. Ce comportement visuo-attentionnel dégradé est associé à un engagement plus faible de ressources attentionnelles dans la tâche visuelle de reprise de la conduite. Ainsi, la persistance de l'engagement au sein de la NDRT durant la période de Take Over Request (TOR) ou préparation à la reprise apporte une explication quant aux performances détériorées observées chez les drivengers dans la littérature (Navarro et al., 2018). De plus, le coût du switch (Monsell, 2003) nécessaire entre la NDRT et la tâche de conduite lors de la reprise pourrait expliquer le comportement visuo-attentionnel et les performances détériorées observés chez les drivengers, en particulier chez les novices (Samuel et al., 2016 ; Wright et al., 2016).

La conduite automatisée de niveau 3 est une activité impliquant l'alternance, qui renvoie dans la littérature au concept de task-switching (Shi et Bengler, 2022 ; Weaver et DeLucia, 2020 ; Zeeb et al., 2017). Lorsque le système alerte le drivenger de la désactivation prochaine du mode automatisé, celui-ci devra se désengager de la NDRT menée afin de s'engager dans la tâche de conduite, ce qui constitue un switch attentionnel. Les recherches montrent que le switch entre tâches est un processus coûteux, pouvant dégrader les performances à l'ensemble des tâches menées en alternance (Da Silva Castanheira et al., 2021; Kiesel et al., 2010; Monsell, 2003; Monsell et al., 2000). Notre troisième étude a investigué les comportements de switch entre la NDRT de visionnage de film et la tâche de reprise de la conduite durant la période de préparation à la reprise (i.e., TOR), en fonction du niveau d'expertise routière des drivengers. Le nombre de switch visuo-attentionnel réalisé entre les deux tâches était mesuré durant la période de préparation à la reprise (i.e., NDRT de visionnage de film par les fixations portées sur la tablette ; tâche de conduite par les fixations portées sur la scène routière, les rétroviseurs et le tableau de bord). Les résultats ont révélé que les drivengers réduisent le nombre de switch fait entre les tâches seulement 3 secondes avant la reprise effective de la conduite. Les novices

réalisent deux fois plus de switch entre les tâches que les experts durant cette période de préparation à la reprise. Le coût du switch, en plus de l'engagement persistant au sein de la NDRT durant cette période de préparation à la reprise, permettrait d'expliquer en partie la dégradation des performances chez les drivengers (e.g., Merat et al., 2012). Ce coût du switch expliquerait également l'incapacité des drivengers novices à engager autant de ressources que les experts au sein de la modalité visuelle de la tâche de conduite (cf. étude 2) et les performances particulièrement détériorées rapportées dans la littérature lors de la reprise effective (e.g., Samuel et al., 2016 ; Wright et al., 2016).

Le premier objectif de l'étude 4 était d'évaluer dans quelle mesure l'état de sous-charge mentale expérimenté durant le mode automatisé et le rétrécissement attentionnel associé (MART, Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020), permettent d'expliquer les performances détériorées observées chez les drivengers, et en particulier chez les novices. Sur la base du modèle MART, le deuxième objectif était d'évaluer dans quelle mesure la réalisation d'une NDRT exigeante durant le mode automatisé permet de maintenir les capacités attentionnelles des drivengers à un niveau optimal et d'améliorer leurs performances de reprise, et ce en fonction de leur niveau d'expertise routière. Les résultats montrent que les drivengers s'engageant au sein d'une NDRT peu exigeante ont une charge mentale et des performances de reprise altérés en comparaison avec les drivengers s'engageant au sein d'une NDRT exigeante (i.e., incapacité à augmenter leur charge mentale durant la reprise ; comportements de freinage à risque, plus brusque et intense, lors des périodes de décélération du véhicule suivi). Par ailleurs, les résultats mettent en évidence que l'engagement au sein d'une NDRT peu exigeante détériore particulièrement le comportement visuo-attentionnel et les performances des novices (i.e., moins d'engagement au sein des zones visuelles relatives à la tâche de conduite lors de la préparation à la reprise ; plus de difficultés à s'adapter à la situation de suivi de véhicule à vitesse irrégulière et à anticiper les changements de vitesse du véhicule suivi, ce qui s'observait

par des accélérations plus intense et brusque dans les situations de décélération du véhicule suivi et une augmentation du time headway, c'est à dire le temps estimé nécessaire au véhicule du conducteur pour atteindre l'emplacement du véhicule suivi, à minima 40 secondes après la reprise contre 20 secondes pour les drivengers des autres conditions). Ces résultats supportent le caractère malléable des ressources attentionnelles et permettent d'expliquer l'impact négatif de la sous-charge mentale sur les performances de reprise des drivengers, en particulier chez les novices.

2. La reprise de l'activité de conduite, un processus coûteux impliquant une réorientation attentionnelle

Wintersberger et al. (2017) ont développé une taxonomie de la reprise de la tâche de conduite, c'est-à-dire de la période de transition de contrôle entre le mode automatisé et le mode manuel de conduite (voir Figure 9 ci-dessous). La période de reprise y est décomposée en 5 phases : la préparation, la perception, la suspension, la reprise suffisante et la reprise totale. Ces 5 phases sont décomposées en fonction des processus intervenant chez le drivenger (i.e., cognitif et/ou moteur) et des processus mis en place par le système automatisé. Ce qui nous intéresse ici concerne les processus cognitifs et moteurs intervenant chez le drivenger lors des phases de perception, de suspension, et de reprise (suffisante et totale). Lorsque l'alerte ou TOR survient, le drivenger perçoit (i.e., processus cognitif) que le système automatisé va se désactiver prochainement, ce qui correspond à la phase de perception. Il va ainsi suspendre cognitivement et physiquement la NDRT menée durant le mode automatisé, ce qui correspond à la phase de suspension. La phase de reprise est décomposée en deux sous-phases. La reprise suffisante correspond d'un point de vue cognitif aux fixations portées sur la scène routière et les zones relatives à la tâche de conduite, et d'un point de vue physique au contrôle moteur du

véhicule. La reprise totale correspond pour ces auteurs à la ré-acquisition totale de la conscience de la situation et aux comportements de conduite adaptés (e.g., stabilité du contrôle longitudinal et latéral du véhicule). Ces auteurs distinguent bien la reprise effective de la conduite (reprise suffisante) de la reprise totale, là où la conscience de la situation et les comportements des drivengers redeviennent optimaux ou conformes à leurs comportements habituels dans un contexte de conduite manuelle non-automatisée. La phase de reprise suffisante correspond ainsi au début de la reprise de la conduite, là où la conscience de la situation des drivengers est incomplète et leurs performances altérées (cf. étude 4). Il a été montré que cette phase de réadaptation est plus longue pour les novices que pour les experts (Samuel et al., 2016 ; Wright et al., 2016), les novices ayant des performances davantage altérées au début de la reprise comme nous l'avons montré dans l'étude 4. La littérature apporte plusieurs explications aux comportements dégradés observés chez les drivengers lors de la reprise effective, c'est-à-dire lors de la période de réadaptation allant de la « reprise suffisante » à la « reprise totale » de l'activité de conduite (Wintersberger et al., 2017). Il s'avère que ces explications, bien que distinctes concernant les processus impliqués dans l'activité de reprise de la conduite, se révèlent complémentaires.

Figure 9. Taxonomie de la reprise de l'activité de conduite (Wintersberger et al., 2017).

Transfer Control Sequence AD to Manual Control		Request Issued			Take-Over Response		Full Handover
		Preparation Scheduled TOR	Perception	Suspension	Sufficient TOR	Control Transition Function	
Cognitive			Perceive Request to Intervene	Cognitive Suspension of Side Activity	Road Fixation		Situation Awareness
Physical				Physical Suspension of Side Activity	Hands on Wheel Foot on Pedal		Longitudinal / Lateral Vehicle Stability
System	Detect Request to Intervene	Prepare Request Driver State Assessment, Workload Management	Detect Request Perception	Adaption of Interfaces & Information Systems	Detection of Motor Readiness		Measure Driving Performance and Situation Awareness
P0	P1		P2			P3	P4

En premier lieu, les modèles de la conscience de la situation expliquent ces comportements détériorés par l'effet out-of-the-loop. En d'autres termes, le retrait du drivenger de la boucle de la conduite, et son engagement au sein d'une NDRT durant le mode automatisé, engendre lors de la reprise des difficultés à réacquérir une conscience de la situation. Les drivengers nécessiteraient ainsi un temps d'adaptation post-reprise afin de réacquérir une conscience de la situation optimale et suffisante à la mise en place de comportements sécuritaires (Endsley, 1995 ; Merat et al., 2019). Dès la survenue de l'alerte, le drivenger doit réorienter son attention de la NDRT vers l'exploration visuelle de la scène routière afin de réacquérir une conscience de la situation suffisante et reprendre le volant de manière sécuritaire. Cependant, nos recherches ont permis de mettre en évidence la difficulté des drivengers à se désengager de la NDRT, ces derniers partageant leur attention entre la NDRT et la tâche de conduite tout au long de la période de préparation à la reprise ou TOR. L'effet out-of-the-loop, ou la difficulté des drivengers à réacquérir une conscience de la situation optimale lors de la reprise effective, apparaît comme une conséquence du manque de ressources investies par le drivenger à l'exploration visuelle de la scène routière durant la période de préparation à la reprise. S'ajoutent à ceci, les comportements d'alternance ou de switch entre tâches durant cette période de TOR. En effet, nos recherches ont mis en évidence que les drivengers switch visuo-attentionnellement et à de multiples reprises entre la NDRT et la tâche de conduite. Le switch étant un processus coûteux (Monsell, 2003), une partie des ressources attentionnelles disponibles chez les drivengers est alors absorbée par leurs comportements de switch, au détriment de la tâche de reprise de la conduite. La persistance de l'engagement au sein de la NDRT et les comportements de switch permettent ensemble d'expliquer les difficultés rencontrées par les drivengers à se former une conscience de la situation optimale lors de la période de préparation à la reprise, et ainsi à mettre en place des comportements adaptés lors de la reprise effective.

3. Validation empirique du modèle MART des ressources attentionnelles malléables

Le modèle MART proposé par Young et Stanton (2002a, b, 2007, 2020) trouve son originalité dans le caractère malléable des ressources attentionnelles. Contrairement aux modèles classiques de l'attention (e.g., Wickens, 2008), ce modèle considère les ressources attentionnelles comme étant malléables, c'est-à-dire que la quantité de ressources disponibles va s'adapter en fonction de la demande de la tâche en cours de réalisation. Ainsi, une dégradation des performances est prévue en cas de surcharge d'un des réservoirs de ressources comme dans les modèles classiques, mais également en cas de sous-charge mentale. Dans ce cas spécifique, la dégradation de performance est le résultat du rétrécissement artificiel des ressources disponibles, ces dernières s'adaptant à la demande de la tâche. Les auteurs ont initialement développé ce modèle afin d'expliquer les performances détériorées observées lors de la période de reprise de la conduite après avoir expérimenté un trajet automatisé. En effet, les recherches montrent que les drivengers expérimentent un état de sous-charge mentale durant le mode automatisé (De Winter et al., 2014). Cependant, aucune étude n'a jusqu'à présent permis de valider le modèle MART dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3, bien que certaines recherches apportent des éléments empiriques en faveur de ce modèle (e.g., Pampel et al., 2019 ; Shi et Bengler, 2022).

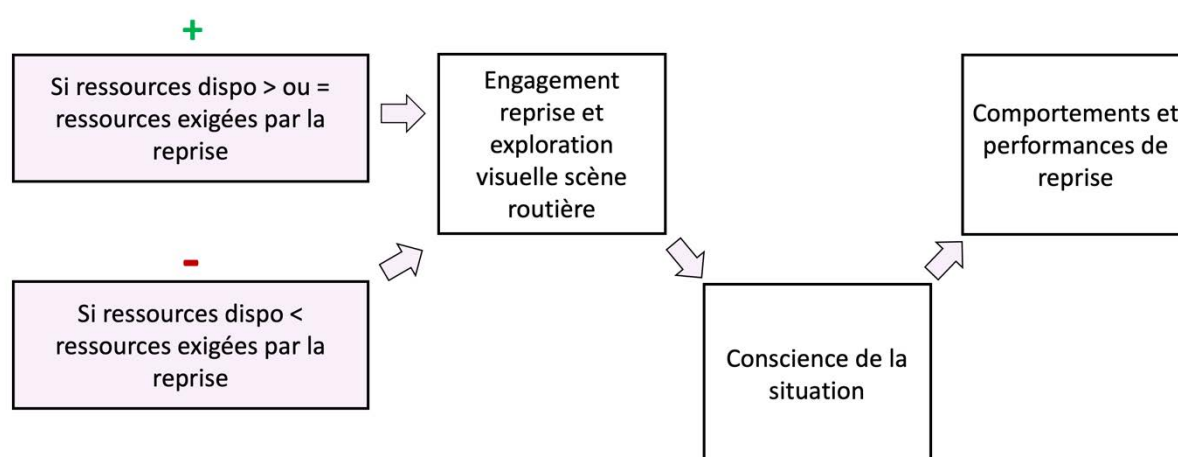
Un des objectifs de cette présente thèse était d'apporter des éléments empiriques au modèle MART, en nous intéressant au contexte de conduite automatisée de niveau 3 et en particulier à la phase de reprise de la conduite manuelle. Nos recherches ont permis de valider ce modèle, appuyant ainsi l'existence d'une malléabilité des ressources attentionnelles. En effet, la charge mentale induite par la NDRT menée durant le mode automatisé impacte les performances de reprise des drivengers. Plus précisément, la réalisation d'une NDRT suffisamment exigeante engendre de meilleures performances lors de la reprise effective que la réalisation d'une NDRT peu exigeante. Les drivengers réalisant une NDRT exigeante

parviennent à augmenter leur charge mentale tout au long du processus de reprise (i.e., TOR + 30 secondes post-reprise ; cf. étude 4 : mesures relatives à la variabilité du rythme cardiaque) contrairement aux drivengers réalisant une NDRT peu exigeante durant le mode automatisé. La sous-charge mentale induite par la NDRT peu exigeante engendre au contraire un rétrécissement temporaire des ressources attentionnelles durant le mode automatisé. Lorsque les exigences de la tâche augmentent soudainement, lors de la survenue de la reprise, les drivengers ne disposent pas de suffisamment de ressources afin de répondre aux exigences de la tâche, altérant la conscience de la situation et les performances de reprise.

Les modèles de la conscience de la situation (Endsley, 1995 ; Merat et al., 2019), bien que majeurs, apparaissent insuffisants dans la compréhension des processus intervenant dans la tâche de reprise de la conduite et les performances détériorées résultantes. A partir des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse, nous considérons que le simple fait d'enlever l'humain de la boucle de la conduite ne suffit pas à expliquer les performances détériorées observées lors de la reprise. L'effet out-of-the-loop apparaît davantage comme une pièce du puzzle permettant de modéliser le comportement du drivenger. Nous proposons ainsi que la conscience de la situation doit être considérée comme le résultat de la quantité de ressources attentionnelles disponibles et investies au sein de la tâche de conduite, notamment par l'exploration visuelle de l'environnement routier, durant les phases de conduite automatisée, et particulièrement lors des phases de TOR ou préparation à la reprise et de reprise effective de la conduite. Cette quantité de ressources attentionnelles disponibles et investies est impactée par une multitude de facteurs tels que la demande de la NDRT menée durant le mode automatisé. Une conscience de la situation erronée ou incomplète mènera le drivenger à une mauvaise compréhension de la situation routière rencontrée et à de potentiels comportements à risques lors de la reprise effective (voir Figure 10 ci-dessous). Le modèle MART apparaît ainsi déterminant dans la compréhension des processus intervenant dans l'activité de conduite automatisée de niveau 3,

notamment dans l'explication des performances détériorées lors des phases de reprise de la conduite manuelle. Cette activité, nouvelle pour l'humain, doit être appréhendée au regard des modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles multiples mais également au regard de la malléabilité des ressources attentionnelles.

Figure 10. Schématisation des relations entre la quantité de ressources disponibles et les performances de reprise.



4. Synthèse des facteurs impactant les performances de reprise

4.1. *L'engagement dans une NDRT*

La conscience de la situation, que vont se former les drivengers, est déterminante de leurs capacités à mettre en place des comportements adaptés lors de la reprise effective de la conduite. Nos recherches ont permis de mettre en évidence que les modalités de conduction de la NDRT ont un impact sur la capacité des drivengers à reprendre la conduite. Plus précisément, la poursuite de la NDRT durant la période de préparation à la reprise (i.e., TOR), et la fréquence

de switch entre la NDRT et la reprise de la conduite durant cette même période, sont des facteurs capables de détériorer les performances de reprise. Là encore, la quantité de ressources attentionnelles disponibles et mobilisées à l'exploration visuelle de l'environnement routier, est déterminante dans la formation de la conscience de la situation. Plus précisément, la poursuite de la NDRT durant la période de préparation à la reprise va nécessiter des ressources attentionnelles qui ne seront plus disponibles pour la tâche de reprise de la conduite. De la même manière, le switch visuo-attentionnel requis lors de la survenue de l'alerte à la reprise entre la NDRT et la tâche de conduite est coûteux en ressources attentionnelles, diminuant la quantité de ressources disponibles pour la reprise de la tâche de conduite. Par ailleurs, plus la fréquence de switch entre tâches est élevée, plus ce processus sera coûteux en ressources. Ainsi, la fréquence élevée de switch chez les novices apporte une explication à leur comportement visuo-attentionnel altéré durant la période de préparation à la reprise, résultant en une conscience de la situation altérée et des performances détériorées.

En plus de ses modalités de conduction, nos recherches ont permis de mettre en évidence que les caractéristiques de la NDRT menée durant le mode automatisé est un facteur déterminant les performances des drivengers lors de la reprise. En effet, la réalisation d'une NDRT exigeante permet de maintenir les capacités attentionnelles à un niveau optimal et ainsi de préserver les performances de reprise. Au contraire, la réalisation d'une NDRT peu exigeante va rétrécir les capacités attentionnelles des drivengers, en réponse à la sous-charge expérimentée, dégradant leur attention investie au sein de la tâche de conduite, leur conscience de la situation et leurs performances de reprise. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par Pampel et al. (2019), où les drivengers avaient de meilleures performances de reprise (i.e., maintien de la position latérale) lorsqu'ils réalisaient une NDRT de jeu visuo-motrice que lorsqu'ils ne réalisaient pas de NDRT durant le mode automatisé. Ici, la réalisation d'une NDRT améliore les performances de reprise. Au contraire, l'étude menée par Merat et al. (2012)

montre que les drivengers ont de moins bonnes performances de reprise lorsqu'ils reprennent la tâche de conduite, après avoir réalisé une NDRT audio-vocale, que lorsqu'ils ne réalisent pas de NDRT. La divergence des résultats peut être expliquée par la nature de la NDRT sélectionnée pour l'expérience. En effet, selon la théorie des ressources multiples (Wickens, 2008), la réalisation d'une tâche visuo-motrice va utiliser des réservoirs de ressources distincts de ceux intervenant dans la réalisation d'une tâche audio-vocale. Les résultats des deux études précédemment décrits apparaissent alors contre-intuitifs. En effet, l'engagement au sein d'une NDRT de jeu visuo-motrice devrait davantage interférer avec la tâche de conduite également visuo-motrice, et dégrader les performances. Au contraire, l'engagement au sein d'une NDRT audio-vocale engendrerait moins d'interférence avec la tâche de conduite puisqu'elles impliquent des ressources différentes. La théorie des ressources attentionnelles malléables (MART, Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020) apporte ici une explication beaucoup plus claire. En accord avec nos recherches, les ressources attentionnelles sont malléables, c'est-à-dire qu'elles vont s'adapter à la demande de la tâche en cours de réalisation. Ainsi, la réalisation d'une NDRT de jeu, impliquant les mêmes réservoirs de ressources que la tâche de conduite, permet de maintenir les ressources nécessaires à la reprise de la conduite à un niveau optimal et ainsi préserver les performances (Pampel et al., 2019). Les futures recherches devront évaluer le modèle MART, au regard de la théorie des ressources multiples, afin d'évaluer dans quelle mesure la demande de la NDRT impacte les capacités attentionnelles et les performances de reprise, en fonction des modalités sensorielles impliquées à l'encodage, au traitement et à la réponse par la NDRT. Ceci s'avère nécessaire dans le développement du modèle MART dans une perspective d'intégration de la multiplicité des réservoirs de ressources, en plus de leur malléabilité. On pourrait alors supposer que la réalisation d'une NDRT, n'impliquant pas les mêmes réservoirs que la conduite (i.e., tâche audio-vocale, Merat et al., 2012) maintient ces

réservoirs de ressources à un niveau optimal, mais pas ceux intervenant dans la tâche de reprise de la conduite, impactant négativement les performances des drivengers.

4.2. Le niveau d'expertise routière

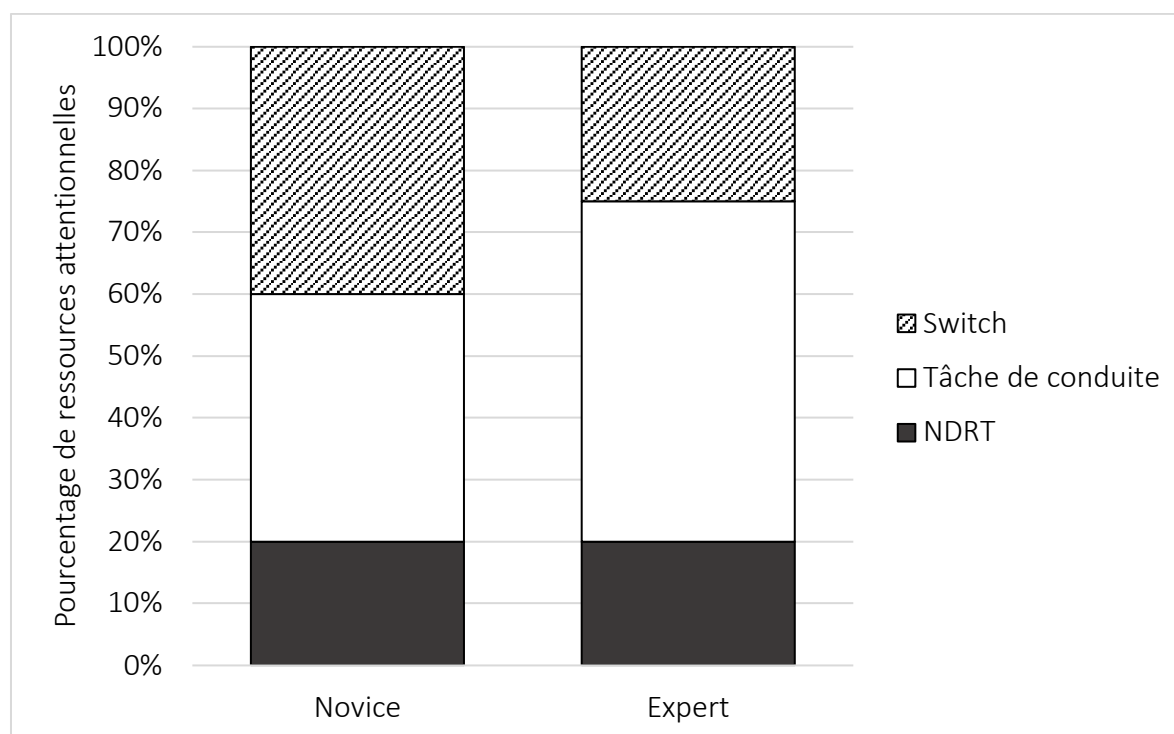
En conduite manuelle, le niveau d'expertise routière des conducteurs est un facteur déterminant la mise en place de comportements sécuritaires. En effet, les recherches montrent que la tâche de conduite est davantage exigeante pour les conducteurs novices que pour les experts. Ceci est expliqué par le fait que les novices n'ont pas automatisé les aspects opérationnels de la tâche de conduite, tels que le contrôle du véhicule (Michon, 1985 ; Schneider and Shiffrin, 1977 ; Shiffrin and Schneider, 1977). De plus, les novices n'ont pas encore développé certaines stratégies visant à diminuer l'effort investi au sein de la tâche de conduite, telles que des stratégies d'exploration visuelle de l'environnement routier (Paxion et al., 2015 ; Underwood, Chapman, & Crundall, 2009). Ainsi, les novices expérimentent davantage de difficultés dans la formation d'une conscience de la situation complète et dans la mise en place de comportements appropriés à la situation routière rencontrée, les rendant plus vulnérables aux accidents de la route (Klauer et al., 2006).

Peu de recherches ont jusqu'à présent investigué l'impact du niveau d'expertise routière sur l'attention, la charge mentale et les performances dans un contexte de reprise en main d'un véhicule automatisé, ce qui était un des objectifs de nos travaux. Dans la mesure où l'expertise se développe avec la pratique et l'exposition répétée aux diverses situations routières existantes, l'acquisition et le maintien de l'expertise s'avèrent être une problématique naissante avec l'automatisation de la conduite. Il semblerait ainsi crucial d'étudier, dès à présent, comment les drivengers novices reprennent la tâche de conduite, après un trajet automatisé, dans la mesure

où les drivengers de demain n'atteindront peut-être jamais un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires et appropriés (Hancock, 2014; Vlakveld, 2015).

Les recherches menées tout au long de cette thèse intéressaient l'étude des comportements des drivengers en fonction de leur niveau d'expertise routière. Sur la base du modèle MART et des résultats obtenus, une représentation de la répartition attentionnelle des drivengers a été réalisée (voir Figure 11 ci-dessous). En accord avec Samuel et al. (2016) et Wright et al. (2016), nos études ont permis de montrer que les novices ont des comportements particulièrement détériorés lors de la reprise, en comparaison aux drivengers experts ou à leurs homologues conducteurs. Ces performances détériorées sont le résultat de l'écart plus important chez les novices que les experts entre leurs ressources mobilisées au sein de la tâche de conduite et les ressources requises par la tâche de conduite lors de la reprise. Tout comme les experts, une partie des ressources attentionnelles des novices est investie au sein de la NDRT qui est poursuivie en alternance durant la période de préparation à la reprise. Cependant, la fréquence de switch réalisée entre la NDRT et la tâche de conduite est deux fois plus élevée chez les novices que les experts durant la période de préparation à la reprise. Le switch étant un processus coûteux en ressources (Monsell, 2003), il s'avère être davantage coûteux pour les novices que pour les experts. La quantité conséquente de ressources attentionnelles dédiées au switch entre tâches chez les novices, ne leur permettent pas d'engager autant de ressources à la tâche de conduite que les experts durant la période de préparation à la reprise. Les novices passent ainsi moins de temps que les experts dans l'exploration visuo-attentionnelle des zones relatives à la tâche de conduite durant la période de préparation à la reprise. Les novices ont alors une conscience de la situation incomplète voire erronée de la situation rencontrée lors de la reprise, détériorant leurs comportements et leurs performances lors de la reprise effective.

Figure 11. Représentation du pourcentage de ressources attentionnelles disponibles investies au sein de la NDRT, de la tâche de conduite et au switch attentionnel entre tâches, durant la phase de préparation à la reprise ou TakeOver Request (TOR).



La fréquence élevée de switch chez les novices peut être expliquée par la demande plus élevée de la tâche de conduite chez les novices que chez les experts (Michon, 1985 ; Schneider and Shiffrin, 1977 ; Shiffrin and Schneider, 1977). En effet, les novices n'ont pas encore automatisé les aspects opérationnels de la tâche de conduite, ce qui rend cette tâche plus exigeante en ressources que pour les experts. Dans notre situation de transition entre les modes automatisés et manuels, les drivengers réalisent en temps partagé la reprise de la tâche de conduite, qui est une tâche ici majoritairement visuelle (Sivak, 1996), et la tâche annexe de visionnage de film, qui est une tâche visuo-auditive. Il est alors impossible de réaliser entièrement en double-tâche, c'est-à-dire simultanément, la tâche annexe et la tâche de reprise de la conduite, dans la mesure où elles partagent la modalité visuelle. Ainsi, les drivengers

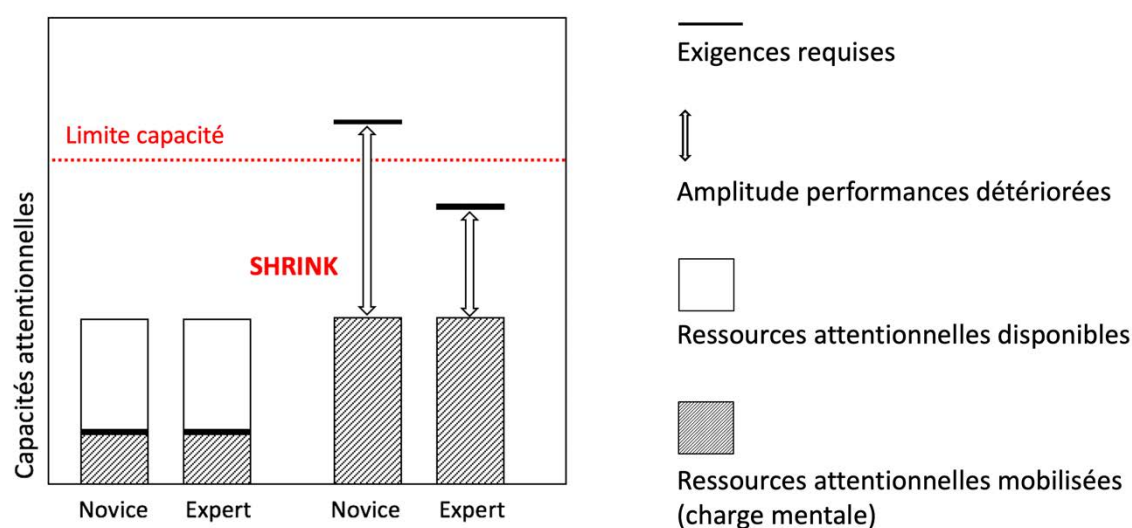
peuvent uniquement réaliser en double-tâche la reprise de la conduite et la modalité auditive de la tâche annexe, et ce, uniquement s'ils ont suffisamment de ressources attentionnelles disponibles (Wickens, 2008). Dans le cas des drivengers novices, leurs ressources disponibles, plus faibles que chez les experts, ne leur permettent pas de réaliser la tâche annexe et la reprise de la conduite en double-tâche, les amenant à augmenter leur comportement de switch entre tâche. Le comportement de switch plus faible mais également présent chez les experts, peut être expliqué ici par la nécessité de poursuivre la modalité visuelle de la tâche annexe, en alternance avec la tâche de reprise de la conduite. Les résultats obtenus lors de la quatrième étude viennent appuyer cet argument. En effet, les résultats ne montraient pas de différence significative dans la fréquence de switch réalisés chez les experts et les novices. Ici, les NDRT étaient visuo-motrices, tout comme la tâche de conduite. Ainsi, la réalisation en double-tâche de la NDRT, en plus de la reprise de la conduite, était impossible. Les drivengers, novices comme experts, devaient ainsi alterner entre les deux tâches, tant qu'ils n'interrompaient pas totalement la NDRT. Bien que la réalisation d'une NDRT visuo-motrice est préférable durant le mode automatisé (Shi et Bengler, 2022), elle peut s'avérer à risque lorsqu'elle est poursuivie durant la période de préparation à la reprise par la fréquence de switch qu'elle induit chez les drivengers, même experts. Les futures recherches devront étudier l'impact de la fréquence de switch sur les performances de reprise de la conduite, chez les novices et les experts, en faisant par exemple varier le moment d'interruption de la NDRT. Il convient également d'évaluer dans quelle mesure les modalités d'encodage, de traitement et de réponse de la NDRT menée durant le mode automatisé impactent la fréquence de switch des drivengers et les répercussions sur leurs performances de reprise.

Nous avons donc vu que les performances de reprise particulièrement détériorées chez les novices sont le résultat de leur manque de ressources investies au sein de la tâche de conduite lors de la préparation à la reprise, et donc une conséquence de la fréquence de switch élevée

d'une part, et de leur engagement persistant au sein de la NDRT d'autre part (voir Figure 11 ci-dessus). Les recherches menées dans le cadre de cette thèse apportent une explication complémentaire aux performances détériorées des novices lors de la reprise. En accord avec le modèle MART, lorsque les exigences de la tâche augmentent soudainement lors de la survenue de la reprise, les novices nécessitent plus de temps que les experts afin que leurs capacités attentionnelles atteignent la demande plus importante de la tâche de conduite. Nos recherches ont également permis de montrer que l'impact de la sous-charge mentale sur les capacités attentionnelles et les performances de reprise est particulièrement négatif chez les drivengers novices. Plus précisément, la réalisation d'une NDRT peu exigeante durant le mode automatisé engendre des performances davantage détériorées chez les novices que les experts. En accord avec le modèle MART et les recherches menées par Samuel et al. (2016) et Wright et al. (2016), les novices nécessitent davantage de temps post-reprise afin que leurs ressources attentionnelles rétrécies atteignent la demande plus importante de la demande de la tâche de conduite, lors de la reprise (voir Figure 12 ci-dessous). Dans des situations particulièrement complexes et exigeantes, telles que la situation programmée dans notre dernière étude, la demande requise par la reprise, pourrait être en dehors de la limite naturelle de leurs capacités. Ceci permet d'expliquer pourquoi les novices ont des performances détériorées, même lorsqu'ils s'engagent dans une NDRT exigeante, lorsqu'ils doivent reprendre le volant dans une situation complexe et exigeante. Bien qu'amointries, leurs performances restent cependant bien meilleures que leurs homologues s'engageant dans une NDRT peu exigeante durant le mode automatisé. Dans la mesure où les drivengers de demain ne développeront peut-être jamais un niveau d'expertise suffisant, il apparaît nécessaire de développer des moyens visant à réduire les risques chez les drivengers, et en particulier chez les novices. Des programmes d'aide à la reprise de la conduite, des programmes de maintien et de développement de l'expertise routière ainsi que des

programmes préventifs sur les comportements à adopter en conduite automatisée s'avèrent nécessaires afin que les véhicules automatisés puissent se développer en sécurité.

Figure 12. Dynamique des ressources attentionnelles des drivengers au regard du modèle MART, en fonction du niveau d'expertise routière.

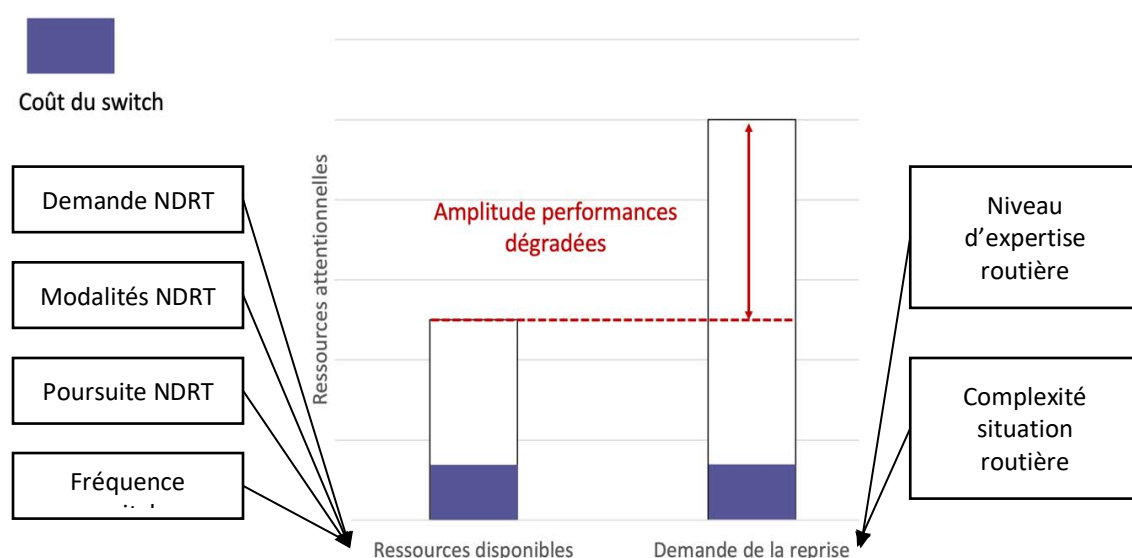


4.3. Conclusion au regard de l'impact des facteurs sur les performances de reprise

L'amplitude des performances détériorées lors de la reprise, va être le résultat de multiples facteurs agissant sur la quantité de ressources disponibles et la quantité de ressources exigées par la tâche de reprise de la conduite (voir Figure 13 ci-dessous). Comme nous l'avons vu, les caractéristiques relatives à la NDRT (i.e., demande de la tâche, modalités sensorielles investies lors de l'encodage, du traitement et de la réponse), la poursuite de la NDRT et la fréquence de switch réalisés durant la période de préparation à la reprise (voire durant la reprise effective) sont des facteurs impactant la quantité de ressources disponibles chez les drivengers lors de la reprise de la conduite. D'autre part, la demande de la situation routière (e.g.,

complexité, criticité) et le niveau d'expertise routière sont des facteurs impactant la demande relative à la tâche de reprise de la conduite. Ensemble, ces facteurs permettent de prédire l'amplitude des performances détériorées lors de la reprise, de par l'écart existant entre la quantité de ressources disponibles et la quantité de ressources requises par la tâche de reprise de la conduite.

Figure 13. Schéma résumant notre contribution sur la compréhension de l'impact des facteurs relatifs à la situation, à l'individu et à la tâche



5. Contributions méthodologiques

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont permis d'apporter plusieurs contributions d'un point de vue méthodologique. Notre première contribution concerne l'apport des expérimentations par scénarios en se basant sur la théorie d'intégration de l'information (Anderson, 1982, 2008). En effet, ce type de protocole expérimental a pour bénéfice d'étudier l'impact d'une multitude de variables, et leurs potentielles interactions, sur une composante

psychologique (i.e., dans l'étude 1, sur la perception qu'ont les individus de la difficulté à reprendre la conduite). Ce type de protocole permet également d'avoir un échantillon de grande taille (par exemple, 200 participants), contrairement aux expérimentations sur simulateur qui sont réalisées en présentiel et qui présentent davantage de contraintes temporelles (i.e., recrutement, déplacement des participants, passations expérimentales longues) et matérielles (i.e., utilisation du simulateur de conduite, de mesures comportementales et physiologiques). Finalement, les protocoles basés sur les scénarios apportent un avantage non négligeable lorsque les passations expérimentales en présentiel sont rétreintes voire impossibles, comme nous l'avons connu durant la pandémie de COVID-19. Bien que ce type de protocole présente plusieurs bénéfices dans l'étude des interactions entre l'humain et les véhicules automatisés, il présente cependant des limites. Notre première étude consistait à évaluer la perception qu'ont les conducteurs de la difficulté de la reprise, plutôt que d'évaluer la difficulté de la reprise selon des indicateurs comportementaux et physiologiques, lors d'une interaction réelle avec ce type de véhicule. Nous préconisons ainsi que ce type de protocole par scénario soit mené dans le cadre d'études exploratoires, permettant d'identifier des variables majeures pouvant, dans un second temps, faire l'objet d'études expérimentales en présentiel, utilisant des mesures comportementales et/ou physiologiques, permettant de mieux appréhender les interactions de l'humain avec les véhicules automatisés.

Une autre contribution méthodologique apportée, concerne l'utilisation de mesures multidimensionnelles dans l'étude des interactions entre l'humain et les véhicules automatisés. Plus précisément, nos recherches ont permis de montrer l'intérêt d'utiliser diverses mesures physiologiques, comportementales et auto-rapportées dans la compréhension des processus psychologiques intervenant chez le drivenger. En premier lieu, l'utilisation de mesures physiologiques ont permis d'évaluer la dynamique de la charge mentale des drivengers tout au long de la conduite automatisée et du processus de reprise de la conduite manuelle, avec

notamment les mesures de la variabilité du rythme cardiaque lors de l'étude 4. Les mesures physiologiques relatives au diamètre pupillaire ont également permis d'évaluer la charge mentale des participants et de discriminer les drivengers des conducteurs ainsi que les novices des experts lors de la deuxième étude menée. L'évaluation de la charge mentale a également été menée à partir de mesures auto-rapportées (NASA-TLX, Hart & Staveland, 1988) lors de l'étude pré-expérimentale menée en amont de l'étude 4. Les mesures comportementales relatives aux mouvements oculaires ont été cruciales dans l'évaluation de l'attention visuelle investie au sein de la tâche de conduite et de la NDRT durant le processus de reprise. D'autre part, la multitude de mesures relatives aux comportements routier (e.g., vitesse moyenne, distance inter-véhicule, time headway) nous ont permis d'évaluer en globalité la qualité de la reprise chez les drivengers. L'ensemble de ces mesures comportementales, physiologiques et auto-rapportées nous a ainsi permis de mieux comprendre l'impact de nos variables sur les capacités des drivengers à reprendre le volant ainsi que les processus psychologiques intervenant dans cette activité nouvelle pour l'humain. La diversité des mesures utilisées apparaît nécessaire, afin de mieux appréhender ces interactions. Par exemple, l'utilisation de mesures pupillométriques, cardiaques et auto-rapportées permettent une meilleure évaluation de la charge mentale, dans la mesure où chaque mesure est sensible à différents changements de charge. Par exemple, il a été montré que le diamètre était plus sensible aux efforts visuels que cognitifs ou auditifs. L'intérêt d'utiliser une approche multidimensionnelle réside dans la différence de sensibilité des mesures de la charge mentale en fonction de sa nature (Miyake, 2001). L'utilisation de mesures diverses, à la fois comportementales, physiologiques et auto-rapportées, s'avère ainsi cruciale dans l'évaluation des interactions entre l'humain et les véhicules automatisés.

Notre troisième contribution méthodologique concerne l'intégration d'une étude pré-expérimentale ayant pour objectif de sélectionner selon des critères précis les jeux constituant

la NDRT lors de l'étude 4. En premier lieu, les critères de sélection étaient identifiés dans la littérature comme ayant une influence majeure sur l'attention et les performances des individus. Quatre variables relatives à la NDRT ont été mises en évidence : le niveau d'appréciation de la tâche, le niveau d'engagement au sein de la tâche, la charge mentale induite par la tâche et les modalités sensorielles engagées par la tâche. L'appréciation et l'engagement étaient contrôlés de deux manières. La première, dans l'étude pré-expérimentale, consistait à évaluer sur une échelle le niveau d'engagement et le niveau d'appréciation des jeux, afin de ne sélectionner que les plus appréciés et ceux ayant suscité le plus haut niveau d'engagement. Les jeux étaient également pré-sélectionnés en fonction de leur note utilisateur moyenne élevée sur le playstore d'Android. La deuxième consistait à sélectionner trois jeux par condition expérimentale lors de l'expérience afin de laisser aux participants la liberté de jouer aux jeux qu'ils souhaitaient, et de pouvoir changer à tout moment, afin de garantir un engagement et une appréciation élevés du jeu lors du mode automatisé. Sur la base du modèle MART (Young et Stanton 2002a, b, 2007, 2020) et de la théorie des ressources multiples (Wickens, 2008), les NDRT étaient sélectionnées afin d'impliquer les mêmes réservoirs de ressources que la tâche de conduite (i.e., modalités sensorielles impliquées : encodage visuel, traitement des informations visuo-spatiales, réponse motrice). Finalement, la charge mentale induite par les jeux était évaluée avec l'échelle auto-rapportée NASA-TLX (Hart et Staveland, 1988) afin de manipuler la demande induite par la NDRT, qui était notre variable indépendante. Les recherches menées en psychologie et ergonomie cognitive sur la reprise de la conduite ne s'attardent souvent que très peu à la sélection des NDRT qui seront réalisées par les drivengers durant le mode automatisé. Cette limite dans la sélection des NDRT, et la grande variabilité des NDRT utilisées dans les recherches, sont à même d'expliquer pourquoi les résultats divergent en ce qui concerne l'effet de la NDRT sur les capacités des drivengers à reprendre le volant. La sélection des NDRT, selon des critères identifiés comme majeurs, s'avère être une étape cruciale à l'étude des

interactions entre l'humain et le système automatisé, dans une perspective d'évaluation et de prévention des risques émergents de ces véhicules.

Jusqu'à présent, la majorité des recherches en ergonomie cognitive sur les véhicules automatisés de niveau 3 se focalisait sur les performances dégradées observées lors de la reprise effective de la conduite manuelle. Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont souligné l'intérêt d'étudier les comportements des drivengers lors de la reprise, mais également durant la période de préparation à la reprise (i.e., durant le TOR) et durant le mode automatisé. L'investigation des périodes précédant la reprise effective, nous a permis de mieux comprendre les processus psychologiques intervenant dans cette activité nouvelle pour l'humain et pourquoi les drivengers ont des difficultés à reprendre le volant, dans une perspective de prévention des risques émergents.

6. Limites et perspectives

Nos recherches menées sur simulateur de conduite intéressaient l'étude de l'effet du niveau d'expertise routière sur les capacités des drivengers à reprendre la conduite manuelle. Afin d'étudier au mieux les différences existantes entre les conducteurs novices et experts, les critères de sélection des recherches menées devaient être suffisamment strictes. Dans cet objectif, les novices étaient des conducteurs ayant une expérience de conduite inférieure à un an (i.e., incluant les périodes de formation à la conduite). Les experts devaient avoir une expérience de conduite régulière et supérieure à 5 ans, et tous les participants devaient avoir le permis B. Les conducteurs devaient également être âgés de moins de 35 ans afin de contrôler les biais associés à l'âge. L'ensemble de ces critères a ainsi limité le recrutement de participants, en particulier concernant le recrutement des novices. S'ajoute à ceci l'impossibilité d'expérimentation durant la pandémie du COVID-19 et le coût temporel et matériel relatif aux

expérimentations sur simulateur de conduite. Ensemble, ces éléments nous ont amené à revoir notre planning expérimental, réduisant le nombre de participants ainsi que le nombre d'études prévues. En effet, deux études prévues n'ont pu être menées dans le cadre de cette thèse. Nous recommandons alors que celles-ci fassent l'objet de futures recherches. La première étude prévue était semblable à l'étude 4, en modifiant cette fois le niveau de complexité de la situation routière présente lors de la reprise. En diminuant la demande de la tâche de reprise, nous supposons que la réalisation d'une NDRT exigeante améliore considérablement les performances de reprise des novices. Le niveau de criticité de la situation routière aurait également été une variable indépendante pertinente. Par exemple, le freinage d'urgence du véhicule suivi aurait permis d'évaluer le temps de réaction des drivengers et leurs capacités à éviter ou non un accident de la route. Les futures recherches devront intéresser l'évaluation de facteurs internes et externes à l'individu, pouvant impacter les capacités attentionnelles d'une part, et la demande de la tâche de reprise d'autre part, et ainsi les performances des drivengers. La deuxième étude que nous avons prévue de mener consistait à l'évaluation de l'impact d'un indicage visuel en tant qu'aide directe à la reprise, sur les capacités de reprise de la conduite des drivengers novices et experts. Bien que des recherches aient menés des travaux sur l'impact de différents indicages sur les performances dans un contexte de conduite manuelle (Rusch et al., 2013; Wright et al., 2017, 2018), peu de recherches n'ont jusqu'à présent étudié leurs effets dans un contexte de reprise de la conduite, ce qui apparaît nécessaire, en particulier chez les novices.

Les résultats des travaux menés au cours de cette thèse ont permis de d'apporter de nouveaux éléments empiriques appuyant le modèle MART (Young and Stanton, 2002a, b, 2007, 2020). Cependant, très peu de recherches se consacrent actuellement à la validation de ce modèle. Celui-ci apparaît déterminant dans la compréhension des processus attentionnels et de la dynamique des ressources de manière générale, et dans un contexte d'automatisation de

la tâche de conduite qui est un sujet majeur dans la société actuelle et dans la recherche en ergonomie et en psychologie cognitive. Il apparaît alors crucial de considérer la dynamique malléable des ressources attentionnelles dans l'étude et la compréhension des processus attentionnels humains, et notamment des comportements des conducteurs et des drivengers. Les futures recherches devront intéresser plus précisément cette dynamique des ressources attentionnelles, en évaluant le temps nécessaire, afin que celles-ci retrouvent un niveau optimal, en fonction des facteurs individuels, situationnels et relatifs à la tâche.

Nos recherches ont également permis de répondre à notre troisième objectif, qui était d'évaluer des moyens visant à améliorer les capacités des drivengers et de réduire les risques émergents des véhicules automatisés. La Table 3 ci-dessous répertorie les trois problèmes majeurs identifiés dans l'activité de conduite automatisée pouvant engendrer des risques lors de la reprise de la conduite manuelle. Les résultats obtenus ont pour la première fois permis de montrer que l'engagement, au sein d'une tâche annexe exigeante, permettait de maintenir les capacités attentionnelles à un niveau optimal et d'engendrer de meilleures performances en comparaison à l'engagement au sein d'une tâche annexe peu exigeante, associée à une sous-charge mentale. Ces résultats apparaissent déterminants en ce qui concerne les préconisations à apporter aux utilisateurs actuels et futurs des véhicules automatisés de niveau 3. En premier lieu, nous préconisons la réalisation de tâches annexes suffisamment exigeantes durant le mode autonome à l'instar de tâches faiblement exigeantes. Nous préconisons également l'interruption immédiate de la tâche annexe, dès le début de l'alerte à la reprise, afin d'éviter un coût supplémentaire associé au switch. Par exemple, l'intégration au code de la route de mesures préventives, concernant le comportement à déployer au sein d'un véhicule automatisé de niveau 3, pourrait réduire les risques émergents de ce type de véhicule.

Les recherches ont également permis de mettre en évidence les difficultés élevées éprouvées par les novices dans la tâche de reprise en main d'un véhicule automatisé de niveau

3. Dans la mesure où l'expertise se développe avec l'expérience, les utilisateurs actuels et futurs pourraient ne jamais atteindre un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires en conduite manuelle et lors des situations de reprise de la conduite (Hancock, 2014; Vlakveld, 2015). Il apparaît ainsi primordial de développer, évaluer et mettre en place, d'une part des aides à la conduite et à la reprise de la conduite chez les novices, et d'autre part, des programmes visant à maintenir et développer l'expertise routière chez les utilisateurs de ces nouveaux véhicules. Il a par exemple été montré que l'indication visuelle de l'environnement routier en projetant des éléments sur le tableau de bord permettait d'améliorer la prise d'information visuelle et le développement de la conscience de la situation en conduite manuelle (Rusch et al., 2013). Cet indicage visuel peut être accompagné d'un signal sonore pour une meilleure intégration des informations (Wright et al., 2017). En conduite automatisée, l'intégration de ce type de dispositif pourrait permettre d'améliorer les performances des drivengers et de réduire les risques présents lors de la reprise, en particulier chez les novices. Les futures recherches devront intéresser l'étude des aides directes à la reprise de la conduite dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3, en évaluant l'effet de la présence d'un indicage, ses modalités sensorielles et la nature même de l'indication (i.e., général vs spécifique à la situation routière rencontrée).

Table 3. Problèmes, solutions et propositions d'implémentation dans une perspective de prévention des risques émergents des véhicules automatisés

Problème identifié	Solution	Implémentation
Poursuite NDRT durant la période de TOR et la reprise effective. Switch entre la NDRT et la reprise de la conduite durant la période de TOR et la reprise effective.	Interruption de la NDRT dès le début de l'alerte ou TOR.	Campagnes préventives. Intégration au code de la route des éléments préventifs. Système d'interruption de la NDRT intégré aux véhicules. Alerte à la reprise multimodale permettant de capturer plus efficacement l'attention des drivengers vers la reprise de la conduite et facilitant l'interruption de la NDRT dès l'alerte.
Sous-charge mentale durant le mode automatisé.	Maintien d'une charge mentale suffisante durant le mode automatisé.	Prévention de type campagne ou intégration au code de la route afin de sensibiliser les utilisateurs des véhicules automatisés sur l'importance de rester actif durant le mode automatisé, recommandations quant à la réalisation d'une tâche visuo-motrice suffisamment exigeante.

	Aide directe à la reprise.	Aide visuelle par projection d'un indiçage visuel sur le tableau de bord et/ou alerte auditive signalant un danger, permettant la reprise d'un balayage visuel efficace de la scène routière, l'identification des risques potentiels et l'acquisition rapide d'une conscience de la situation suffisante (Rusch et al., 2013 ; Wright et al., 2017).
Faible niveau d'expertise routière, perte de l'expertise.	Maintien et développement de l'expertise.	Stages de conduite visant le développement et le maintien de l'expertise tout au long de la vie. Imposer un niveau de km parcourus par an nécessaire au maintien et au développement de l'expertise.
	Aide directe à la reprise.	Aide visuelle par projection d'un indiçage visuel sur le tableau de bord et/ou alerte auditive signalant un danger, permettant la reprise d'un balayage visuel efficace de la scène routière, l'identification des risques potentiels et l'acquisition rapide d'une conscience de la situation suffisante (Rusch et al., 2013 ; Wright et al., 2017).

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif général de cette thèse était de mieux comprendre les processus psychologiques intervenant dans l'activité de conduite automatisée de niveau 3, dans une perspective de prévention des risques émergents de cette nouvelle technologie. Les recherches expérimentales menées répondaient ainsi à quatre sous-objectifs. Le premier était de mieux comprendre les processus intervenant dans la tâche de reprise et la cause des comportements dégradés chez les drivengers, en particulier chez les novices. Les résultats ont permis de mettre en évidence que les performances altérées, observées dans la littérature lors de la reprise, pouvaient être expliquées par un manque de ressources attentionnelles disponibles lors de la reprise, suite à un rétrécissement des ressources attentionnelles en réponse aux faibles exigences de la tâche menée durant le mode automatisé. Les résultats soulignent ainsi l'importance d'étudier et d'intégrer la malléabilité des ressources attentionnelles dans les modèles de l'attention en psychologie et ergonomie cognitive. Ainsi, l'écart trop important entre les ressources disponibles et les ressources requises par la tâche vont engendrer une détérioration de l'attention investie par les drivengers au sein de la tâche de reprise de la conduite. Ceci va détériorer leur conscience de la situation et leurs performances de reprise, ce qui va augmenter les risques encourus, en particulier si la reprise survient dans une situation urgente.

Notre deuxième était de mieux comprendre l'impact de facteurs individuels, situationnels et relatifs à la tâche sur les comportements des drivengers et leurs performances de reprise. Ainsi, l'engagement dans une tâche annexe peu exigeante détériore les performances des drivengers dans une situation de reprise complexe et exigeante. Au contraire, l'engagement au sein d'une tâche annexe exigeante maintient leurs capacités attentionnelles à un niveau optimal, engendrant de meilleures performances. Ces résultats sont modulés par le niveau d'expertise routière.

Notre troisième objectif était d'évaluer des moyens visant à réduire les risques, en améliorant les capacités des drivengers. Les résultats suggèrent ainsi que la réalisation d'une tâche annexe exigeante préserve les capacités attentionnelles et les performances de reprise des drivengers. Pour la première fois, les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont permis d'apporter des éléments empiriques en faveur du modèle MART, en identifiant un effet bénéfique de l'engagement au sein d'une tâche annexe exigeante, au détriment d'une tâche annexe peu exigeante. L'intégration au modèle MART des facteurs impactant d'une part les ressources disponibles et d'autre part les ressources requises par la tâche de reprise, nous a ainsi permis de mieux comprendre la dynamique des ressources attentionnelles de l'humain, du conducteur et drivengers.

Finalement, notre quatrième et dernier objectif était de proposer un modèle de l'activité de conduite automatisée de niveau 3, en s'appuyant sur les modèles de la conscience de la situation, les modèles des ressources attentionnelles et les modèles du switch attentionnels. Ce modèle permet ainsi de prédire l'amplitude des performances détériorées en fonction des ressources attentionnelles disponibles et de la demande relative à la tâche de conduite, ces derniers étant influencés par des facteurs internes (e.g., niveau d'expertise routière) et externes (e.g., exigences de la NDRT, modalités sensorielles de la NDRT, exigences de la situation routière rencontrée lors de la reprise) à l'individu ainsi que par les comportements de switch réalisés entre les tâches durant la période de transition de contrôle.

Très peu de recherches en psychologie et ergonomie cognitive ne se sont jusqu'à présent intéressées à la validation empirique du modèle MART des ressources attentionnelles malléables (Young et Stanton, 2002a, b, 2007, 2020). Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont pour la première fois permis de valider ce modèle dans un contexte de conduite automatisée de niveau 3. Les futures recherches devront intéresser davantage l'évaluation de ce modèle dans diverses activités, afin de mieux comprendre la dynamique malléable des

ressources attentionnelles chez l'humain. Il apparaît nécessaire que la recherche fondamentale en psychologie cognitive s'intéresse à ce modèle, afin d'intégrer la dynamique malléable des ressources aux modèles de l'attention et de la charge mentale.

RÉFÉRENCES

- Alport, A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). 17 Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. *Google Scholar*.
- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2014). *Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers*. Rand Corporation.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. In *Analysis, design and evaluation of man-machine systems* (pp. 129–135). Elsevier.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276.
- Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Mayenobe, P., & Banet, A. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers' mental representations. *Safety Science*, 47(9), 1205–1221.
- Bertoncello, M., & Wee, D. (2015). Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world. *McKinsey & Company*, 6.
- Cain, B. (2007). A review of the mental workload literature. *DTIC Document*.
- Campagne, A., Pebayle, T., & Muzet, A. (2004). Correlation between driving errors and vigilance level: Influence of the driver's age. *Physiology & Behavior*, 80(4), 515–524.
- Cellier, J.-M. (1996). *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*.
- da Silva Castanheira, K., LoParco, S., & Otto, A. R. (2021). Task-evoked pupillary responses track effort exertion: Evidence from task-switching. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 21(3), 592–606. <https://doi.org/10.3758/s13415-020-00843-z>
- de Winter, J. C. F., Happee, R., Martens, M. H., & Stanton, N. A. (2014). Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A

- review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 196–217. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.06.016>
- Deniel, J., & Navarro, J. (2023). Gaze behaviours engaged while taking over automated driving: A systematic literature review. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 24(1), 54–87.
- Desmond, P. A., & Hoyes, T. W. (1996). Workload variation, intrinsic risk and utility in a simulated air traffic control task: Evidence for compensatory effects. *Safety Science*, 22(1–3), 87–101.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., & Gupta, S. (2006). *The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment*. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety
- Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 32(2), 97–101.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32–64.
- Evans, L. H., Herron, J. E., & Wilding, E. L. (2015). Direct real-time neural evidence for task-set inertia. *Psychological Science*, 26(3), 284–290.
- Falkmer, T., & Gregersen, N. P. (2005). A Comparison of Eye Movement Behavior of Inexperienced and Experienced Drivers in Real Traffic Environments: *Optometry and Vision Science*, 82(8), 732–739. <https://doi.org/10.1097/01.opx.0000175560.45715.5b>
- Gershon, P., Sita, K. R., Zhu, C., Ehsani, J. P., Klauer, S. G., Dingus, T. A., & Simons-Morton, B. G. (2019). Distracted driving, visual inattention, and crash risk among teenage drivers. *American Journal of Preventive Medicine*, 56(4), 494–500.

- 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*, 58(4), 642–652.
- Hale, A. R., Stoop, J., & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, 33(10–11), 1377–1387.
- Hancock, P. A. (2014). Automation: How much is too much? *Ergonomics*, 57(3), 449–454.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier.
- Heikoop, D. D., de Winter, J. C. F., van Arem, B., & Stanton, N. A. (2016). Psychological constructs in driving automation: A consensus model and critical comment on construct proliferation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 17(3), 284–303.
<https://doi.org/10.1080/1463922X.2015.1101507>
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science*, 143(3611), 1190–1192.
- Heudin, J.-C. (2008). *Les Créatures artificielles: Des automates aux mondes virtuels*. Odile Jacob.
- Insee. (2019). La voiture, premier mode de transport des salariés. Insee.
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3714237>
- 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.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kienle, M., Damböck, D., Kelsch, J., Flemisch, F., & Bengler, K. (2009). Towards an H-Mode for highly automated vehicles: Driving with side sticks. *Proceedings of the 1st*

International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 19–23.

- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching—A review. *Psychological Bulletin*, 136(5), 849–874. <https://doi.org/10.1037/a0019842>
- Klauer, C., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). *The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data*.
- Lee, J. D., & Strayer, D. L. (2004). Preface to the special section on driver distraction. *Human Factors*, 46(4), 583–586.
- 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>
- Lemercier, C. (2022). Mobilité 4.0 et ergonomie cognitive. Penser l’humain dans un environnement autonome et connecté. *JECIS*, 1.
- Lemercier, C., & Cellier, J.-M. (2008). Les défauts de l’attention en conduite automobile: Inattention, distraction et interférence: *Le travail humain*, Vol. 71(3), 271–296. <https://doi.org/10.3917/th.713.0271>
- Lestina, D. C., & Miller, T. R. (1994). Characteristics of crash-involved younger drivers. *Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 38, 425–437.
- Litman, T. (2020). *Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning*.

- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95(4), 492.
- Mayhew, D. R., Simpson, H. M., & Pak, A. (2003). Changes in collision rates among novice drivers during the first months of driving. *Accident Analysis & Prevention*, 35(5), 683–691.
- McGwin Jr, G., & Brown, D. B. (1999). Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 31(3), 181–198.
- Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). How Do Drivers Behave in a Highly Automated Car? *Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design : Driving Assessment 2009*, 514–521.
<https://doi.org/10.17077/drivingassessment.1365>
- 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., Jamson, A. H., Lai, F. C. H., Daly, M., & Carsten, O. M. J. (2014). Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 274–282.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.09.005>
- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J. D., Johansson, E., Green, C. A., Katazaki, 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>

- Mercedes me media. (2022). DRIVE PILOT : Le système de conduite autonome de Mercedes-Benz. Mercedes-Benz. <https://media.mercedes-benz.com/driv-pilot>
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. C. Schwing (Eds.), *Human Behavior and Traffic Safety* (pp. 485–524). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Miyake, S. (2001). Multivariate workload evaluation combining physiological and subjective measures. *International Journal of Psychophysiology*, 40(3), 233–238. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(00\)00191-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(00)00191-4)
- Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(3), 134–140. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7)
- Monsell, S., Yeung, N., & Azuma, R. (2000). Reconfiguration of task-set: Is it easier to switch to the weaker task? *Psychological Research*, 63, 250–264.
- Navarro, J. (2019). A state of science on highly automated driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 366–396. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1439544>
- Neisser, U. (1978). *Perceiving, anticipating, and imagining*.
- Novak, M. (2007). GM Car of the Future (1962). Paleofuture. <https://paleofuture.com/blog/2007/6/29/gm-car-of-the-future-1962.html>
- Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière. (2022). Bilan 2022 de la sécurité routière. <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-linsecurite-routiere/bilans-annuels-de-la-securite-routiere/bilan-2022-de-la-securite-routiere>
- Pampel, S. M., Large, D. R., Burnett, G., Matthias, R., Thompson, S., & Skrypchuk, L. (2019). Getting the driver back into the loop: The quality of manual vehicle control following long and short non-critical transfer-of-control requests: TI:NS. *Theoretical*

- Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 265–283.
- <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1463412>
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39(2), 230–253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(2), 140–160.
- Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Overload depending on driving experience and situation complexity: Which strategies faced with a pedestrian crossing? *Applied Ergonomics*, 51, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.014>
- Poisson, C., Safin, S., Langlois, S., Bationo-Tillon, A., & Decortis, F. (2015). Analyse de l'activité et approche systémique de situations de délégation de conduite: Apport pour la compréhension de l'activité de conduite automobile autonome. *Actes de La SELF*, 134–141.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25.
- Posner, M. I. (1988). *Structures and function of selective attention*. American Psychological Association.
- 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>

- 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*, 3, 257–266.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2003). Mental workload while driving: Effects on visual search, discrimination, and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 9(2), 119–137. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.9.2.119>
- Roche, F., Somieski, A., & Brandenburg, S. (2019). Behavioral changes to repeated takeovers in highly automated driving: Effects of the takeover-request design and the nondriving-related task modality. *Human Factors*, 61(5), 839–849.
- Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(2), 207.
- Rubinstein, J. S., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(4), 763.
- Rusch, M. L., Schall, M. C., Gavin, P., Lee, J. D., Dawson, J. D., Vecera, S., & Rizzo, M. (2013). Directing driver attention with augmented reality cues. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 16, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2012.08.007>
- 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: Journal of the Transportation Research Board*, 2602(1), 115–120. <https://doi.org/10.3141/2602-14>
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1.

- 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., & Bengler, K. (2022). Non-driving related tasks' effects on takeover and manual driving behavior in a real driving setting: A differentiation approach based on task switching and modality shifting. *Accident Analysis & Prevention*, 178, 106844.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84(2), 127.
- Singh, S. (2015). *Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey*.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: Is it indeed 90% visual? *Perception*, 25(9), 1081–1089.
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2021). *Taxonomy and Definitions for terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*.
- Spelke, E., Hirst, W., & Neisser, U. (1976). Skills of divided attention. *Cognition*, 4(3), 215–230.
- Stanton, N. A., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the Driver's Control Tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 221–236. https://doi.org/10.1207/S15327566IJCE0503_5
- 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>

- Tsang, P.S. and Vidulich, M.A. (2006) Mental Workload and Situation Awareness. In: Salvendy, G., Ed., *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 243-268.
<https://doi.org/10.1002/0470048204.ch9>
- Ünal, A. B., Steg, L., & Epstude, K. (2012). The influence of music on mental effort and driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 271–278.
- Underwood, G., Chapman, P., & Crundall, D. (2009). Experience and visual attention in driving. *Human Factors of Visual and Cognitive Performance in Driving*, 89–116.
- Vlakveld, W. (2015). *Transition of control in highly automated vehicles: A literature review*.
- Wandtner, B., Schömig, N., & Schmidt, G. (2018). Secondary task engagement and disengagement in the context of highly automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 253–263.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.001>
- 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.
- Weaver, B. W., & DeLucia, P. R. (2022). A systematic review and meta-analysis of takeover performance during conditionally automated driving. *Human Factors*, 64(7), 1227–1260.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449–455.
<https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Wintersberger, P., Green, P., & Riener, A. (2017, June). Am I driving or are you or are we both? A taxonomy for handover and handback in automated driving. In *Driving Assessment Conference* (Vol. 9, No. 2017). University of Iowa.

- Wright, T. J., Agrawal, R., Samuel, S., Wang, Y., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2018). Effective cues for accelerating young drivers' time to transfer control following a period of conditional automation. *Accident Analysis & Prevention*, 116, 14–20.
- Wright, T. J., Agrawal, R., Samuel, S., Wang, Y., Zilberstein, S., & Fisher, D. L. (2017). Effects of alert cue specificity on situation awareness in transfer of control in level 3 automation. *Transportation research record*, 2663(1), 27-33.
- 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>
- Yoon, S. H., & Ji, Y. G. (2019). Non-driving-related tasks, workload, and takeover performance in highly automated driving contexts. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 60, 620–631. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.11.015>
- Young, K., & Regan, M. (2007). *Driver distraction: A review of the literature*. 29.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002a). Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 178–194. <https://doi.org/10.1080/14639220210123789>
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002b). Malleable Attentional Resources Theory: A New Explanation for the Effects of Mental Underload on Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(3), 365–375. <https://doi.org/10.1518/0018720024497709>

Young, M. S., & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324–1339.

<https://doi.org/10.1080/00140130701318855>

Young, M. S., & Stanton, N. A. (2020). The Decay of Malleable Attentional Resources Theory. In P. D. Bust (Ed.), *Contemporary Ergonomics 2006* (1st ed., pp. 253–257).

Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003072072-61>

Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A., & Schrauf, M. (2017). Why is steering not the same as braking? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver interventions during conditionally automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 50, 65–79.

Titre : Prévention des risques émergents des véhicules automatisés : Comment améliorer les capacités attentionnelles des drivengers ?

Mots clés : Charge mentale, Attention, Expertise routière, Conduite automatisée, Prévention, Conscience de la situation

Résumé : En supprimant le facteur humain de la conduite, l'automatisation des véhicules prévoit de diminuer la mortalité routière. Cependant, les véhicules automatisés actuels et futurs ne retirent que partiellement l'humain de la boucle de la conduite. Avec un véhicule automatisé de niveau 3, l'humain pourra s'engager dans diverses tâches annexes mais devra être capable de reprendre le volant en cas d'inopérabilité du système. Ce retrait partiel de l'humain est problématique, les drivengers (contraction de conducteur et de passager) ont des comportements à risques lorsqu'ils doivent reprendre le contrôle de leur véhicule après un trajet automatisé de niveau 3. Plusieurs explications sont apportées dans la littérature, comme l'effet « out-of-the-loop » : retirer l'humain de la boucle de la conduite impacterait ses capacités à réacquérir une conscience de la situation optimale après la reprise, expliquant ses comportements inadaptés. Les modèles du switch attentionnel expliquent ces performances altérées par le coût du switch entre la tâche annexe et la conduite, imposé lors de la reprise. Le modèle MART propose une explication basée sur la dynamique malléable des ressources attentionnelles : ces performances détériorées seraient la conséquence du rétrécissement des ressources disponibles, en réponse à la sous-charge mentale expérimentée durant le mode automatisé. L'objectif principal de cette thèse est de mieux comprendre la cause des performances dégradées observées chez les drivengers lors de la reprise, et des facteurs pouvant les impacter. Dans la mesure où l'expertise routière se développe avec la pratique, les drivengers de demain n'atteindront peut-être jamais un niveau d'expertise suffisant à la mise en place de comportements sécuritaires. Ainsi, nos études se sont intéressées à l'étude des comportements des novices lors de la reprise.

La première étude montre que la moitié des individus a une perception inadéquate de la reprise, percevant celle-ci comme trop facile ou difficile. La deuxième étude évalue le comportement visuo-attentionnel des drivengers durant la préparation à la reprise en fonction de leur expertise routière. Les résultats montrent des comportements visuo-attentionnels particulièrement altérés chez les drivengers novices en comparaison aux experts et à leurs homologues conducteurs. La troisième étude a pour objectif de mieux comprendre la cause des comportements visuo-attentionnels altérés, en particulier chez les novices, en évaluant leur fréquence de switch attentionnel. Les résultats montrent que les novices ont une fréquence de switch deux fois plus élevée que les experts, pouvant expliquer leurs performances dégradées. Enfin, la dernière étude évalue le modèle MART comme modèle explicatif des difficultés des drivengers à reprendre la conduite manuelle. Les résultats montrent que s'engager dans une tâche annexe exigeante durant le mode automatisé préserve les comportements lors de la reprise, alors qu'une tâche annexe peu exigeante, associée à un état de sous-charge, engendre un rétrécissement des ressources attentionnelles disponibles et des performances de reprise dégradées. L'effet négatif de la sous-charge mentale impacte particulièrement les novices, la différence entre ressources attentionnelles disponibles et requises pour la tâche de reprise étant plus importante que pour les experts. Les résultats des quatre études sont discutés au regard des modèles de la conscience de la situation, des ressources attentionnelles et du switch attentionnel.

Title: Prevention of emerging risks from automated vehicles: How to enhance the attentional capacities of drivengers?

Key words: Mental workload, Attention, Driving experience, Automated driving, Prevention, Situation awareness

Abstract: By removing the human factor from driving, vehicle automation aims to reduce road mortality. However, current and future automated vehicles only partially remove humans from the driving loop. With a level 3 automated vehicle, humans can engage in various Non-Driving-Related Tasks (NDRT) but must be capable of taking over the wheel if the system fails. This partial removal of humans poses problems; "drivengers" (contraction of driver and passenger) exhibit risky behaviors when they must regain control after a level 3 automated journey. Several explanations are offered in the literature, such as the "out-of-the-loop" effect: removing humans from the driving loop impacts their ability to regain optimal situational awareness upon takeover, explaining their inappropriate behaviors. Attention switch models explain these impaired performances due to the cost of switching between the NDRT and the driving task during takeover. The MART model proposes an explanation based on the malleable dynamics of attentional resources: degraded performances result from the narrowing of available resources in response to mental underload experienced during automated mode. The main goal of this thesis is to better understand the causes of degraded performances observed in drivengers during takeover and the factors influencing them. Given that driving experience develops with practice, future drivengers may never achieve sufficient expertise for safe driving behaviors. Therefore, our studies focus on novice behaviors during takeover.

The first study shows that half of the individuals have an inadequate perception of takeover, perceiving it as either too easy or difficult. The second study evaluates the visuo-attentional behavior of drivengers during preparation for takeover based on their driving experience. Results indicate significantly impaired visuo-attentional behaviors among novice drivengers compared to experts and their drivers' counterparts. The third study aims to better understand the cause of impaired visuo-attentional behaviors, especially among novices, by evaluating their attentional switch frequency. Results show novices have twice the switch frequency compared to experts, potentially explaining their degraded performances. Finally, the last study evaluates the MART model as an explanatory model for the difficulties drivengers experience during takeover. Findings indicate engaging in a demanding NDRT during automated drive preserves takeover behaviors, while engaging in low demanding NDRT (mental underload), narrows available attentional resources and degrades takeover performances. The negative impact of mental underload particularly affects novices, with a greater gap between available and required attentional resources for the takeover task compared to experts. Results from all four studies are discussed in relation to models of situational awareness, attentional resources, and attentional switching.