



Impact d'un système anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur

Mercedes Bueno-Garcia

► To cite this version:

Mercedes Bueno-Garcia. Impact d'un système anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur. Neurosciences [q-bio.NC]. UNIVERSITE BORDEAUX 2, 2013. Français. NNT : . tel-00910310

HAL Id: tel-00910310

<https://theses.hal.science/tel-00910310>

Submitted on 27 Nov 2013

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

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



IFSTTAR

INSTITUT FRANÇAIS
DES SCIENCES
ET TECHNOLOGIES
DES TRANSPORTS,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DES RÉSEAUX

Thèse de doctorat

Obtenu le 27 septembre 2013

Impact d'un système anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur

par **Mercedes BUENO GARCÍA**

en vue de l'obtention du titre de docteur en **Neurosciences**
de l'**Université Bordeaux 2** dans le cadre
de l'école doctorale **Science de la Vie et de la Santé**

Structure de recherche d'accueil : IFSTTAR - Lescot

Année 2013

Thèse n° 2041

THÈSE

pour le

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 2

Ecole doctorale Science de la Vie et de la Santé

Mention : Sciences, Technologie, Santé

Option : Neurosciences

Présentée et soutenue publiquement

Le 27 septembre 2013

Par Mercedes BUENO GARCÍA

Née le 10 mai 1983 à Úbeda, Jaén (Espagne)

Impact d'un système anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur

Membres du Jury

Mr Pierre DENISE, PU-PH, Univ. de CaenRapporteur
Mr Michael FALKENSTEIN, Professeur, Univ. de Dortmund.....Rapporteur
Mr Ángel CORREA, Chercheur, Univ. de Grenade.....Examineur
Mr Frank MARS, Chercheur CNRS, Univ. de Nantes.....Examineur
Mme Colette FABRIGOULE, Directrice de recherche, CNRS, Univ.
de BordeauxDirectrice
Mme Alexandra FORT, Chercheur IFSTTAR, Univ. de Lyon.....Encadrante

REMERCIEMENTS

...beaucoup de travail, beaucoup d'effort, mais surtout beaucoup de remerciements...

...a lot of work, a lot of effort, but mainly a lot to thank...

...mucho trabajo, mucho esfuerzo, pero sobre todo mucho que agradecer...

Un énorme merci à mes deux directrices Alexandra et Colette. Merci pour toutes les choses que vous m'avez apprises, merci pour votre disponibilité, votre soutien et vos mots d'encouragements. Nous sommes une très bonne équipe, sinon comment serions-nous arrivées à écrire el « artículo de la muerte ? » Alexandra, c'est très difficile d'écrire en deux lignes toutes les choses pour lesquelles je dois te remercier tant au niveau professionnel que personnel. Je suis contente d'avoir eu l'occasion de te l'avoir déjà dit, t'es vraiment géniale ! Colette, cela a été un honneur d'être sous ta direction. J'ai beaucoup grandi professionnellement dans ce parcours. Cela est dû, bien sûr, à beaucoup de travail mais aussi à l'envie d'arriver un jour à avoir une expérience, les qualités de chercheuse et une carrière professionnelle comme la tienne.

Je remercie Franck Mars et Ángel Correa d'avoir accepté d'examiner mon travail, ainsi que Michael Falkenstein et Pierre Denise d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse. Merci aussi pour le temps que vous m'avez consacré.

Un grand merci à tout le LESCOT ! Merci à Corinne Brusque et à Hélène Tattegrain pour m'avoir facilité, respectivement, le début et la fin dans ce parcours. Merci à tous ceux qui sont toujours là, Christophe, Vero, Catherine, Joceline, ... et ceux qui sont déjà partis, Maud, Marjo, Valerie, Soizick... Merci de m'avoir accueillie aussi chaleureusement au labo, merci pour tous ces moments de détente, merci de m'avoir aidée à améliorer mon français et d'avoir essayé (sans le réussir) de me faire comprendre votre merveilleux système administratif. Merci également à Mathilde François de nous avoir aidées avec la passation et l'analyse des données de notre deuxième expérience. Merci à l'équipe technique Daniel, Philippe, Bruno et Fabien, qu'aurais-je fait sans vous ?

Thank you very much to the whole ADAPTATION team. A very special thanks goes to all senior researchers. Thank you for the time dedicated, for your comments, questions and suggestions, which have undoubtedly enriched this work. And you guys, many thanks! It has been great to share this time with you, all the seminars, the presentations, all the dinners, and some other special moments... I wish you all the best and I hope that one day you can understand finally the examples of my dual task!

Como no, gracias a mi antiguo equipo de la Universidad de Granada, Candi, Sergio y Javi. Gracias por haberme acompañado durante mis primeros pasos como investigadora. Candi, si no hubiera sido por ese pequeño gran empujón que me diste, hoy no estaría aquí. Gracias por todo lo que me has aportado y por haber confiado en mí.

Mari Luz, Pedro, Fátima, Paco, Analy, Chica, Barja, Huertas, Alicia, Taboadas, Javi...sois los mejores, ea! Gracias por las lágrimas de risa que me habéis hecho derramar y las que sé que quedan por venir. Gracias también por haber estado a mi lado cuando las lágrimas no han sido de alegría.

Y gracias también a todas las grandes personas que he conocido en tierras francesas. Alicia, menos mal que al final te encontré. Vero, éste es realmente tu sitio en mis agradecimientos. Christophe, gracias por estar ahí.

Finalmente, gracias a mi familia, a vosotros os lo debo todo. Este trabajo está especialmente dedicado a vosotros.

TABLE DE MATIÈRES

Résumé	7
Abstract.....	9
Liste des Figures	11
Liste des Tableaux	13
Préambule	15
1. Introduction Générale	17
2. Cadre Théorique.....	21
2.1. Le système d'alerte anticollision	21
2.1.1. Contexte	21
2.1.2. Définition, pourcentage et causes des collisions par l'arrière	22
2.1.3. Définition et types de systèmes anticollision	23
2.1.4. Modalités du signal avertisseur	24
2.1.5. Fonctionnement du système anticollision : Algorithmes.....	26
2.1.6. Systèmes réels sur le marché	26
2.1.7. Bénéfices du système	27
2.1.8. Facteurs influençant l'efficacité des systèmes	29
2.1.8.1. Fiabilité du système.....	30
2.1.8.2. Impact de l'état attentionnel des conducteurs.....	31
2.1.9. Adaptation comportementale au système	35
2.2. Modèles cognitifs et processus attentionnels en conduite automobile	37
2.2.1. Théories cognitives sur le traitement de l'information	38
2.2.1.1. L'attention comme un filtre sélectif.....	38
2.2.1.2. L'attention comme un réservoir de ressources	38
2.2.2. Modèles attentionnels.....	42
2.2.2.1. Le rôle du signal avertisseur	43
2.2.3. Modèles cognitifs de la conduite	45
2.2.4. Quelles sont les conséquences de la distraction au volant ?.....	46
2.2.4.1. Effets de la distraction au niveau comportemental	47
2.2.4.2. Effets de la distraction au niveau du traitement de l'information.....	48
3. Méthodologie	51
3.1. Electroencéphalographie et Potentiels Évoqués.....	51
3.1.1. Présentation générale de la méthode	52
3.1.1.1. Définition	52
3.1.1.2. Montage des électrodes	52
3.1.1.3. Traitement du signal	53
3.1.1.4. Avantages et limites	55
3.1.2. Composantes des PE analysées.....	55
3.1.2.1. La Variation Contingente Négative (VCN)	55
3.1.2.2. La N1 visuelle	56
3.1.2.3. La N2	57
3.1.2.4. La P3	57
3.1.3. Choix expérimentaux.....	58
3.2. Les simulateurs de conduite.....	59

3.2.1. Généralités	59
3.2.2. Le simulateur de conduite simplifié	60
3.2.2.1. Description	60
3.2.2.2. Avantages et limites	61
3.2.2.3. Scenarios	62
3.2.3. Le simulateur de conduite plus réaliste	63
3.2.3.1. Description	63
3.2.3.2. Avantages et limites	64
3.2.3.3. Scénarios	64
4. Partie Expérimentale	65
4.1. Expérience 1 : Une étude électrophysiologique de l'impact d'un système d'alerte anticollision dans une tâche de conduite simulée	65
4.1.1. Objectif et justification	65
4.1.2. Méthode	66
4.1.2.1. Population	66
4.1.2.2. Protocole	66
4.1.3. Discussion des principaux résultats	67
4.2. Article 1.....	69
4.3. Expérience 2: Efficacité d'un système d'alerte anticollision en simple et double tâche d'un point de vue électrophysiologique	81
4.3.1. Objectif et justification.....	81
4.3.2. Méthode.....	81
4.3.2.1. Population	81
4.3.2.2. Protocole	82
4.3.3. Discussion des principaux résultats	82
4.4. Article 2.....	83
4.5. Expérience 3 : Adaptation comportementale et efficacité d'un système d'alerte anticollision en fonction de la tâche secondaire cognitive	89
4.5.1. Objectif et justification.....	89
4.5.2. Méthode.....	90
4.5.2.1. Population	90
4.5.2.2. Protocole	90
4.5.3. Discussion des principaux résultats	92
4.6. Article 3.....	93
5. Discussion Générale	113
5.1. L'impact du signal avertisseur sur le traitement de l'information	113
5.2. L'impact de la fiabilité du système	114
5.3. Impact de l'état attentionnel du conducteur	115
5.4. Adaptation comportementale au système.....	118
6. Conclusion et Perspectives	121
Références	125
Annexes.....	133
Annexe 1 : Chapitre d'ouvrage.....	135
Annexe 2 : Liste de publications.....	153

RÉSUMÉ

Impact d'un système anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur

Ce travail de thèse a été centré sur l'analyse de l'impact d'un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur en conduite automobile simulée. Les objectifs de ce travail étaient 1) de déterminer l'impact d'un signal avertisseur associé à un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information à partir de potentiels évoqués ; 2) d'analyser l'efficacité d'un tel système en fonction de sa fiabilité ; 3) et en fonction de l'état attentionnel des conducteurs ; et 4) d'examiner l'adaptation comportementale au système au cours du temps.

Grâce à une double approche comportementale et électrophysiologique, nous avons montré que le signal avertisseur agit au niveau de l'anticipation et de la préparation à la réponse ainsi qu'au niveau cognitif du traitement de l'information. Par ailleurs, nous avons confirmé que les systèmes anticollision ne nécessitent pas d'être complètement fiables pour être efficaces. Nous avons également observé que l'efficacité du signal avertisseur associé au système anticollision était moindre chez les sujets distraits, notamment lorsque la charge cognitive associée à la distraction était élevée. Ceci suggère que le signal avertisseur nécessite des ressources attentionnelles pour être traité et, donc, pour être efficace. Concernant l'adaptation comportementale au système, les principaux résultats ont montré, d'une part, que l'introduction immédiate du système a eu un effet positif sur le comportement de conduite et, d'autre part, que le processus d'adaptation au système à plus long terme peut être affecté si les conducteurs sont distraits par des tâches secondaires coûteuses en ressources attentionnelles.

Mots clés :

Signal avertisseur, conduite simulée, traitement de l'information, potentiels évoqués, fiabilité, distraction, adaptation comportementale.

ABSTRACT

Impact of a collision warning system on information processing and driver behaviour

This thesis was focused on the analysis of the impact of a collision warning system on information processing and driver behaviour in simulated driving. The objectives of this work were 1) to determine the impact of a warning signal associated with a collision warning system on the processing of information using evoked potentials, 2) to analyse the effectiveness of such a system according to its reliability, 3) and according to the drivers' attentional state, 4) to examine the behavioural adaptation to the system over time.

Using an electrophysiological and behavioural dual approach, we showed that the warning signal acts at the level of anticipation and response preparation and at the level of cognitive processing. Moreover, we confirmed that collision warning systems do not need to be completely reliable to be effective. We also observed that the effectiveness of the warning signal associated with the collision warning system was lower in distracted subjects, especially when the cognitive load associated with the distraction was high. This suggests that the warning signal requires attentional resources in order to be processed and, therefore, to be effective. Concerning behavioural adaptation to the system, the main results showed firstly that the immediate introduction of the system had a positive effect on the driving behaviour and secondly that the process of adaptation of the system at the longer term may be affected if drivers are distracted by high demanding secondary tasks.

Keywords:

Warning signal, driving simulator, information processing, event related potentials, reliability, distraction, behavioural adaptation.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Modèle cognitif de Norman et Shallice (1986)	39
Figure 2. Modèle du « <i>centre exécutif</i> » de Baddeley (1974 ; 2000)	40
Figure 3. Le modèle de ressources multiples de Wickens (1984)	40
Figure 4. Représentation du montage des électrodes selon le Système International 10-20 sur l'hémisphère gauche (A) et vue de dessus (B). D'après Jasper (1958).	53
Figure 5. Représentation de la méthode d'extraction des potentiels évoqués. En haut : signal EEG enregistré en continu à partir d'une électrode pendant la présentation de stimuli. En bas : PE obtenu par moyennage de séquences du signal EEG calées sur les stimulations.....	54
Figure 6. Représentation typique de la composante de la variation contingente négative.....	55
Figure 7. Représentation typique de la composante N1.	56
Figure 8. Représentation typique de la composante N2.	57
Figure 9. Représentation typique de la composante P3.	58
Figure 10. Vue de dessus (gauche) et postérieure (droite) de l'emplacement des 34 électrodes.....	59
Figure 11. Contexte expérimental et matériels utilisés pendant les deux premières expériences.	61
Figure 12. Images issues des scénarios et illustrant à gauche la scène de suivi de la moto à une distance inter-véhiculaire prédéfinie et à droite la décélération de la moto avec le feu arrière allumé (cible).	62
Figure 13. Contexte expérimental de la troisième expérience.	63
Figure 14. Schéma illustrant les ressources attentionnelles disponibles pour traiter le signal avertisseur en simple et en double tâches.	68
Figure 15. Séquence expérimentale pour chaque essai dans les trois conditions de système.....	69
Figure 16. Séquence expérimentale pour chaque essai dans les deux conditions de système.....	82
Figure 17. Schéma illustrant les ressources attentionnelles disponibles pour traiter le signal avertisseur en simple tâche et en double tâche difficile et facile.	90
Figure 18. Design expérimental montrant les conditions système et distraction pour chacun des trois groupes pendant les cinq scénarios.	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Structure générale et contenu de chaque chapitre de la thèse.	20
Tableau 2. Récapitulatif des études illustrant les effets du système anticollision chez les conducteurs distraits.....	32
Tableau 3. Récapitulatif des études illustrant les effets du système anticollision chez les conducteurs distraits et non distraits.	33

PRÉAMBULE

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre du projet européen ADAPTATION (<http://adaptation-itn.eu/>) financé par un programme Marie Curie de type *Initial Training Network (ITN)*. Le principal objectif des programmes ITN est l'entraînement et la formation de jeunes chercheurs par un réseau d'universités, d'entreprises et d'instituts de recherche autour d'une thématique commune. Cette formation est basée principalement sur les connaissances scientifiques acquises à partir d'un travail de recherche individuel pouvant donner lieu à une thèse. En plus, le programme est complété par d'autres modules de formation complémentaires utiles à la fois dans la réalisation du travail de thèse et au développement d'une carrière de chercheur.

L'objectif général du projet ADAPTATION est d'étudier l'adaptation comportementale du conducteur au cours du temps suite à l'usage de systèmes avancés d'assistance au conducteur (regroupés sous l'acronyme générique anglo-saxon ADAS pour *Advanced Driver Assistance Systems*). La fonction principale des ADAS est d'informer, d'avertir et d'intervenir en cas de situations critiques pour le conducteur. Ces systèmes ont connu un fort développement au cours des dernières années grâce à leurs effets positifs dans le domaine de la sécurité routière. Toutefois, leur efficacité peut dépendre du type de système (fonction), des technologies employées (design, fiabilité, etc.) et des caractéristiques du conducteur (âge, état attentionnel, expérience, etc.). Ces thématiques ont été abordées au travers des dix travaux de thèse conduits dans le cadre du projet ADAPTATION.

1. INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Les travaux de cette thèse portent sur un système particulier d'assistance à la conduite : le système d'alerte anticollision frontale (regroupés sous l'acronyme générique anglo-saxon FCWS pour *Forward Collision Warning System*). Ces systèmes sont conçus pour avertir les conducteurs du risque de collision existant lorsque le véhicule approche un obstacle. Les travaux de cette thèse portent sur un système particulier d'assistance à la conduite : le système d'alerte anticollision frontale (regroupés sous l'acronyme générique anglo-saxon FCWS pour *Forward Collision Warning System*). Ces systèmes sont conçus pour avertir les conducteurs du risque de collision existant lorsque le véhicule approche un obstacle.

L'objectif général de ce travail est d'étudier, en conduite automobile simulée, l'impact d'un FCWS sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur. D'un point de vue cognitif, le FCWS est composé principalement d'un signal avertisseur qui aide le conducteur à rediriger son attention vers un danger potentiel sur la route et à se préparer pour initier une réponse adéquate. L'efficacité de ce signal peut être évaluée en analysant le comportement des conducteurs. Par exemple, vont-ils réagir plus rapidement lorsque le signal est déclenché ? ou encore, vont-ils adopter des distances de sécurité plus importantes quand le système anticollision est activé ? Les mesures comportementales recueillies dans un simulateur de conduite ou sur route réelle (temps de réaction, temps inter-véhiculaire, vitesse, etc.) constituent un bon reflet de la performance des conducteurs. Toutefois, si l'analyse du comportement du conducteur a été l'une des mesures les plus fréquemment utilisées, ce n'est pas le seul moyen d'analyser l'impact des systèmes anticollision. Bien souvent, ces mesures sont couplées à d'autres techniques telles que l'analyse des informations fournies par les conducteurs (par exemple, questionnaires ou groupes de discussion) ou encore l'analyse des mesures physiologiques (par exemple, l'électrooculographie, la réponse galvanique de la peau, la fréquence cardiaque, l'électroencéphalographie, etc.). Ce dernier type de mesures est beaucoup moins utilisé et son enregistrement nécessite souvent des contextes plus contrôlés comme les simulateurs de conduite. Cependant, l'information additionnelle fournie par ces mesures ne peut pas être inférée à partir des mesures comportementales isolées.

Dans ce travail, deux approches ont été utilisées pour étudier l'impact du FCWS. Tout d'abord, nous avons suivi une approche traditionnelle basée sur l'analyse de la performance des conducteurs (principalement, les temps de réactions). D'autre part, et cela représente l'une des principales innovations de ce travail, nous avons utilisé une approche électrophysiologique permettant l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau (électroencéphalographie, EEG) et l'analyse des potentiels évoqués (PE). Cette technique est un outil efficace pour dissocier les stades sensoriels et cognitifs du traitement de l'information. Ainsi, le premier objectif dans ce travail de thèse a été d'analyser dans quelle mesure le signal avertisseur d'un FCWS modifie le traitement de l'information au niveau neural et à quelle étape du traitement intervient cette modification.

Les systèmes anticollision qui sont conçus pour assister le conducteur dans la détection d'information importante, comme un événement potentiellement dangereux, ne sont jamais entièrement fiables. Fausses alarmes et défauts de détection des événements dangereux sont des erreurs qui apparaissent avec une relative fréquence dans les véhicules équipés de FCWS. Nous pouvons nous attendre à ce que l'efficacité et l'acceptabilité de ces systèmes puissent varier en fonction de leur niveau de fiabilité. Le deuxième objectif de cette thèse est donc d'étudier comment différents niveaux de fiabilité du système vont affecter le traitement de l'information et le comportement des conducteurs.

Par ailleurs, la distraction étant le principal facteur impliqué dans les collisions par l'arrière, ces systèmes d'alerte anticollision devraient aider particulièrement les conducteurs distraits. Or, leur efficacité a été principalement démontrée chez les conducteurs non distraits. Nous pouvons dès lors nous interroger sur l'efficacité de ces systèmes lorsque les conducteurs sont distraits. Par conséquent, le troisième objectif de ce travail est d'évaluer l'effet d'un système anticollision sur le comportement et le traitement de l'information selon l'état attentionnel du conducteur (distracté ou non distracté).

Enfin, le quatrième objectif de ce projet concerne la question de l'adaptation comportementale à ces systèmes. Plus précisément, il s'agit de déterminer si l'usage des systèmes change le comportement de conduite des conducteurs au cours du temps. Ces systèmes sont conçus pour aider les conducteurs lorsque des dangers potentiels sont détectés. Cependant, des effets négatifs initialement non prévus pourraient apparaître à la suite de l'usage de ces systèmes et en fonction de facteurs comme le niveau de fiabilité du système.

Pour répondre à ces objectifs, trois expériences ont été conçues et conduites au cours de cette thèse. Les deux premières expériences ont été effectuées dans un contexte de laboratoire en utilisant un simulateur de conduite simplifié composé d'un ordinateur, d'un écran, d'un volant et d'un pédalier. Bien que ce milieu contrôlé soit très différent d'une conduite réelle sur route, il nous a permis d'enregistrer l'activité électrique du cerveau via les potentiels évoqués.

L'objectif de la première expérience était d'évaluer l'impact d'un système anticollision sur le comportement du conducteur et sur le traitement de l'information visuelle pertinente en conduite (l'illumination du feu arrière du véhicule précédent), d'une part, en fonction de la fiabilité du système, et d'autre part, en fonction de l'état attentionnel des conducteurs.

Des résultats inattendus dans cette première expérience concernant l'efficacité du signal avertisseur en condition de distraction nous ont conduits à réaliser une deuxième expérience afin de préciser ces résultats. Plus précisément, dans la première expérience, l'allumage des feux arrière de la voiture de devant était toujours précédé d'une décélération. Cette décélération était donc un meilleur prédicteur du feu stop que le signal avertisseur, et cela pourrait diminuer son efficacité. Ainsi, dans la deuxième expérience nous avons modifié légèrement le paradigme expérimental précédemment utilisé afin de mieux analyser l'efficacité du signal comme le seul prédicteur de la cible, en fonction de l'état attentionnel du conducteur.

Finalement, pour être plus proche d'une situation de conduite réelle, une troisième expérience a été réalisée sur un simulateur de conduite plus réaliste permettant une immersion plus importante que dans les expériences précédentes. Cependant, dans ces conditions, le recueil des données électrophysiologiques n'a pas pu être possible. Cette expérience a été constituée autour de deux objectifs. D'une part, il s'agissait d'analyser l'adaptation comportementale pendant les premières utilisations du système, mais aussi après une exposition plus longue au système. D'autre part, il s'agissait d'analyser l'efficacité du système en condition de distraction. Les recherches précédentes avaient suggéré que le traitement du signal avertisseur nécessitait des ressources attentionnelles pour être efficace. Pour tester cette hypothèse, dans cette expérience, nous avons étudié l'efficacité du signal en fonction de deux niveaux de difficulté de la tâche distractive.

La structure de cette thèse se compose de six chapitres (voir Tableau 1). Après cette introduction générale, nous allons présenter le cadre théorique dans le chapitre 2. Tout d'abord, nous ferons une description générale des ADAS, puis nous donnerons une définition plus détaillée des FCWS, de leur fonctionnement et de leur efficacité. Dans un deuxième temps, nous discuterons certains modèles cognitifs portant sur l'attention et la conduite automobile. Le troisième chapitre de ce travail sera consacré à la présentation de la méthodologie utilisée dans ces trois expériences. Tout d'abord, nous présenterons les techniques de l'électroencéphalographie et l'analyse des potentiels évoqués, puis nous présenterons les outils de simulation de conduite automobile : le simulateur simplifié et le simulateur plus réaliste. Le quatrième chapitre se composera des trois expériences qui forment la partie expérimentale de cette thèse. Chaque expérience sera présentée par un résumé détaillé avec les questions posées, la méthode et l'interprétation des principaux résultats, ainsi que le papier correspondant publié ou soumis dans une revue internationale à comité de lecture. Dans le cinquième chapitre de discussion générale, nous ferons une synthèse des principaux résultats et de leurs interprétations. Enfin, dans le sixième chapitre nous présenterons des conclusions générales et nous évoquerons des pistes de recherche pour aller plus loin sur ces questions.

Tableau 1. Structure générale et contenu de chaque chapitre de la thèse.

STRUCTURE GÉNÉRALE	CONTENU			
Chapitre 1 Introduction Générale	Objectifs généraux de la thèse			
Chapitre 2 Cadre Théorique	Système d'alerte anticollision			
	Modèles attention et conduite			
Chapitre 3 Méthodologie	Électroencephalographie et potentiels évoqués			
	Simulateur simplifié et simulateur plus réaliste			
Chapitre 4 Partie Expérimentale	Expérience	Outils	Mesures	Variables
	1	Simulateur simplifié	-Potentiels évoqués -Comportementales	-État attentionnel -Fiabilité du système
	2	Simulateur simplifié	-Potentiels évoqués -Comportementales	-État attentionnel (signal avertisseur comme le seul prédicteur)
	3	Simulateur réaliste	-Comportementales	-Adaptation comportementale -État attentionnel (deux niveaux de distraction)
Chapitre 5 Discussion Générale	Discussion des principaux résultats			
Chapitre 6 Conclusion et perspectives	Conclusion et perspectives			

2. CADRE THÉORIQUE

2.1. Le système d'alerte anticollision¹

2.1.1. Contexte

Dans la dernière décennie, le nombre de victimes d'accidents de la route en Europe a diminué considérablement avec des baisses atteignant plus de 40% (European Commission, 2013). Mais malgré ces chiffres encourageants, les accidents de la circulation restent l'un des principaux facteurs contribuant à la mortalité et ils ont été la première cause de décès chez les jeunes âgés de 5 à 29 ans en 2008 en Europe (World Health Organization, 2011). Ces données indiquent qu'il s'agit d'un problème non résolu ayant un grand impact humain et socio-économique. L'adoption de nouvelles stratégies est nécessaire afin d'atteindre l'objectif fixé par la Commission Européenne de réduire de moitié le nombre de victimes d'accidents de la route en 2020 (European Commission, 2010). Mais cet objectif n'est pas exclusivement européen. En effet, les Nations Unies ont déclaré la période 2011-2020 comme la Décennie de l'Action pour la Sécurité Routière (United Nations, 2010). Dans ce contexte, de nouvelles mesures ont été proposées pour essayer d'améliorer l'éducation et la formation des utilisateurs, renforcer l'application des règles de sécurité routière, améliorer les infrastructures ainsi que les services d'urgence et la protection des utilisateurs plus vulnérables (European Commission, 2010; World Health Organization, 2004). Des progrès en matière de sécurité routière sont également espérés par le développement de véhicules « intelligents » et plus sûrs (European Commission, 2010; World Health Organization, 2004). Les systèmes de transport intelligent (ITS pour

¹ Cette partie est résumée sous la forme d'un chapitre d'ouvrage ([Annexe 1](#)) :

Bueno, M., Fabrigoule, C., and Fort, A. (2014). Effectiveness of Forward Collision Warning Systems: a contribution from the cognitive analysis combining behavioural and electrophysiological measures. In A. Stevens, C. Brusque & J. Krems (Eds). *Driver adaptation to information and assistance systems*. IET published book. ISBN: 978-1-84919-639-0; E-ISBN: 978-1-84919-640-6

les sigles en anglais *Intelligent Transport Systems*) sont conçus avec l'objectif d'améliorer la sécurité, l'efficacité, la mobilité et la productivité dans le domaine du transport (Bayly, Fildes, Regan, & Young, 2007). Différents concepts et catégories ont été adoptés pour définir et classer les nombreux systèmes de transport intelligents qui sont apparus dans les dernières années (Bayly et al., 2007; Wege & Victor, 2010). Les systèmes d'information à bord du véhicule (IVIS pour *In-Vehicle Information Systems*) et les systèmes avancés d'assistance au conducteur (ADAS) sont deux catégories utilisées fréquemment pour classer les nouveaux systèmes qui ont émergé dans le domaine du transport. Les premiers ont souvent été associés à des tâches non directement liées à la conduite (musique, téléphone, etc.), mais ils comprennent aussi des tâches liées à des fonctions de navigation (par exemple, GPS) et de planification (par exemple, les systèmes d'information sur le trafic, la météo ou les infrastructures). La fonction principale des ADAS est d'assister le conducteur dans les tâches liées au contrôle du véhicule et la réalisation de manœuvres (par exemple, contrôle latéral et longitudinal du véhicule, assistance au stationnement, etc.) (Östlund et al., 2005; Pauzié & Amditis, 2011). Une taxonomie plus étendue des ADAS peut être faite en fonction du type d'intervention que ces systèmes offrent au conducteur. Ainsi, nous pouvons parler des systèmes d'information au conducteur, des systèmes d'avertissement des dangers potentiels et des systèmes d'intervention qui peuvent prendre le contrôle du véhicule si nécessaire (voir par exemple, Gietelink, Ploeg, De Schutter, & Verhaegen, 2009; Huth, Bueno, Fort, & Brusque, 2014).

En général, les estimations fournies dans différents rapports concernant les effets des ADAS montrent un bilan très positif en termes de sécurité routière en soulignant la réduction du nombre de victimes sur les routes (McKeever, 1998; OECD, 2003). Bien que le but initial des ADAS soit l'amélioration de la sécurité, l'introduction de ces systèmes et l'interaction avec les conducteurs peut constituer une importante transformation des pratiques habituelles dans l'activité de conduite. Par conséquent, suite à l'apparition de ces systèmes sur le marché, une grande partie de la recherche a été concentrée dans le domaine des facteurs humains afin d'analyser l'impact, à la fois positif mais aussi potentiellement négatif, de ces systèmes sur le comportement des conducteurs. Au cours de cette thèse nous nous sommes plus spécifiquement intéressés au système anticollision.

2.1.2. Définition, pourcentage et causes des collisions par l'arrière

Les FCWS ont été développés pour avertir les conducteurs des collisions potentielles avec un véhicule à l'avant. Ces collisions rentrent dans la catégorie des collisions « par l'arrière », définies par la Commission européenne (2006) comme une « collision entre deux véhicules circulant dans la même direction sur la même route. Le premier véhicule a un point de collision par l'arrière, l'autre véhicule a un point de collision frontale » (p. 10).

Ces accidents représentent l'un des types très fréquents de collision dans certaines parties du monde, comme aux États-Unis, en Russie ou au Japon, expliquant approximativement 30% des accidents (Ikari, Kaito, Nakajima, Yamazaki, & Ono, 2009; NHTSA, 2009; UNECE, 2007, 2011; Watanabe & Ito, 2007). En Europe, le taux de prévalence de ces accidents est réduit d'environ 13% (Van Kampen, 2003), mais il existe une très grande variabilité entre les différents pays européens, par exemple, ces accidents représentent 11% des collisions en France et 18% en Espagne (UNECE, 2007). En plus d'un taux non négligeable de mortalité et de blessures, ces accidents représentent un coût économique important pour la société et perturbent gravement la circulation.

Les collisions par l'arrière peuvent être causées par des facteurs environnementaux, des facteurs liés au véhicule et/ou des facteurs humains. La plupart de ces collisions se produisent pendant la journée (entre 9h30 et 15h30), dans de bonnes conditions météorologiques, sur des lignes droites et lorsque la surface de la chaussée est sèche et avec des vitesses modérées généralement inférieures à 60 km/h. Par conséquent, les conditions environnementales ne représentent pas un pourcentage très élevé d'implication dans ces accidents : 11 à 15% des collisions par l'arrière en fonctions des différentes études (Dingus et al., 2006; Knipling, Wang, & Yin, 1993; Vogel & Bester, 2005). Les problèmes techniques du véhicule, comme une faille des freins, expliquent environ 10% de ces collisions (Knipling et al., 1993; Vogel & Bester, 2005). C'est le facteur humain qui est la principale cause des collisions par l'arrière, expliquant de 75% à 93% des cas selon les études (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993; Vogel & Bester, 2005). Parmi les facteurs humains, l'inattention du conducteur a été identifiée comme étant le premier facteur contributif, impliqué dans environ deux tiers de ces accidents (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993). Les jeunes jusqu'à 24 ans représentent la catégorie la plus impliquée dans ce type de collision (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993; Singh, 2003). Concernant le genre, les hommes pourraient être légèrement plus impliqués dans ce type d'accidents (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993; Singh, 2003).

2.1.3. Définition et types de systèmes anticollision

Etant donné l'importance du facteur humain dans les collisions par l'arrière, l'utilisation des systèmes anticollisions peut se présenter comme une contre-mesure pour prévenir ce type de collisions.

Les systèmes d'alerte anticollision (FCWS) sont basés sur des capteurs qui surveillent en continu certains paramètres tels que la distance, la vitesse relative et la position latérale entre le véhicule précédent et le véhicule équipé. Lorsqu'un certain seuil est atteint, le système fournit un signal avertisseur pour prévenir le conducteur de la présence d'un risque potentiel de collision. Dans la conception des systèmes, il est préconisé que le signal avertisseur prenne fin lorsque la condition de déclenchement n'est plus remplie ou lorsque le conducteur a initié une réponse appropriée (e.g.,

freinage) (SAE J2400, 2003). En plus d'avertir les conducteurs de la présence d'une possible collision au moyen du déclenchement d'une alerte (FCWS), certains systèmes anticollision peuvent également prendre une part active (Forward Collision Avoidance System, FCAS) dans le processus d'évitement ou d'atténuation de la collision principalement par la modulation de l'application partielle ou complète des freins. De plus, une traction sur la ceinture de sécurité peut à la fois avertir d'une collision potentielle et assurer plus de sécurité en cas de collision. Ces différents types de systèmes actifs pourraient prévenir ou réduire la gravité de la collision si le conducteur ne réagit pas à temps ou s'il ne réagit pas du tout, par exemple, en cas de distraction ou de somnolence. Ainsi, un système actif pourrait être d'un grand bénéfice dans la prévention de collisions, car il a été démontré que la plupart des conducteurs n'appliquent pas assez de force sur la pédale de frein pour éviter la collision (Breuer, Faulhaber, Frank, & Gleissner, 2007) et qu'un pourcentage élevé des conducteurs ne relâchent pas la pédale d'accélérateur ou même ne réagissent pas du tout (Najm, Stearns, Howarth, Koopmann, & Hitz, 2006) dans ce type de collisions. Cependant, ces systèmes actifs pourraient comporter également un risque plus grand pour les autres usagers de la route en cas de faux positifs ou fausses alarmes, c'est-à-dire, quand le système réagit lorsqu'il n'y a pas de danger (Grover et al., 2008).

2.1.4. Modalités du signal avertisseur

Diverses modalités des signaux avertisseurs ont été employées pour alerter les conducteurs : signal auditif, visuel ou tactile.

En ce qui concerne les signaux auditifs, des recherches ont essayé de déterminer le type signal le plus approprié pour éviter les collisions par l'arrière. Les signaux auditifs peuvent être présentés sous la forme d'une tonalité simple (par exemple, un signal à une fréquence de 2000 Hz), une tonalité spécifique associée à une signification particulière connue de l'utilisateur (par exemple, le son indiquant la réception d'un message), une icône auditive (par exemple, le klaxon d'une voiture) ou un message vocal (par exemple, « danger ») (Campbell, Richard, Brown, & McCallum, 2007). En général, les signaux sonores les plus efficaces en termes de temps de réaction plus rapides correspondent à des sons simples (Campbell et al., 2007) qui peuvent être plus facilement manipulés pour générer un sentiment d'urgence (Edworthy, Loxley, & Dennis, 1991). Les icônes auditives ont également prouvé leur efficacité dans la réduction des temps de réaction des conducteurs (Belz, Robinson, & Casali, 1999; Graham, 1999; Harder, Bloomfield, & Chihak, 2003). Cependant, leur utilisation pourrait être source de confusion pour les conducteurs qui peuvent avoir des problèmes lorsqu'il s'agit de distinguer si le son vient de l'extérieur ou de l'intérieur de l'habitacle (Campbell et al., 2007).

La présentation soudaine d'un symbole remarquable est la méthode la plus appropriée pour fournir des informations de type visuel au conducteur (Campbell et al., 2007). Il est recommandé que les

signaux visuels soient situés dans un angle de vision entre 10 et 15°, de façon à ce qu'ils puissent être détectés facilement sans que le conducteur ait à changer la direction du regard (Campbell et al., 2007; SAE J2400, 2003). De plus, ces signaux devraient être utilisés pour compléter ou renforcer un signal primaire de type auditif ou tactile. En effet, l'information pourrait ne pas être perçue par le conducteur ou pourrait même être une source de distraction si la modalité visuelle est utilisée comme le seul moyen d'alerte (ISO 15623, 2002; SAE J2400, 2003).

Les signaux tactiles présentés dans les systèmes anticollision peuvent se présenter principalement comme une vibration dans le volant ou le siège, comme une traction dans la ceinture de sécurité ou comme une force antagoniste sur la pédale d'accélérateur (Campbell et al., 2007). En général, les signaux tactiles se sont révélés moins efficaces que les signaux auditifs (Ho, Reed, & Spence, 2007; Ho & Spence, 2009) et les résultats concernant leur utilisation ne sont pas concluants. Il semblerait que l'information haptique puisse ne pas être perçue par les conducteurs dans certaines situations, par exemple, sur certaines surfaces de route ou en fonction de la position et des mouvements du conducteur (Kiefer et al., 1999). Ainsi, les systèmes utilisant exclusivement le mode tactile comme moyen d'alerter le conducteur devraient être limités aux situations dans lesquelles le signal auditif n'est pas complètement efficace (par exemple, lors de l'usage simultané d'autres systèmes d'alerte auditive, lorsque le conducteur a des problèmes auditifs, etc.) (Campbell et al., 2007).

De nombreuses études ont mis en évidence le bénéfice des signaux multimodaux par rapport aux signaux unimodaux (Campbell et al., 2007; Ho et al., 2007; Ho & Spence, 2009), les premiers étant plus facilement perçus par les conducteurs dans des conditions de distraction (Kramer, Cassavaugh, Horrey, Becic, & Mayhugh, 2007; Spence & Santangelo, 2009).

Certaines préconisations (Campbell et al., 2007; ISO 15623, 2002; SAE J2400, 2003) indiquent que pour augmenter son efficacité, le système anticollision devrait avertir les conducteurs en deux étapes. Dans un premier temps, le système devrait fournir un avertissement « préliminaire » à la collision pour informer le conducteur de la présence de l'obstacle puis dans un second temps, un avertissement « imminent » à la collision pour informer le conducteur de la nécessité de réagir pour éviter la collision. De plus, l'usage des signaux auditifs est recommandé en combinaison avec des signaux visuels (Campbell et al., 2007; Kiefer et al., 1999; Kramer et al., 2007). Ceci permettrait d'améliorer l'efficacité du signal surtout dans des conditions bruyantes et pourraient également apporter une information redondante ou supplémentaire au signal auditif (Campbell et al., 2007).

2.1.5. Fonctionnement du système anticollision : Algorithmes

Le déclenchement du signal avertisseur est déterminé au moyen d'algorithmes qui calculent un seuil spécifique en fonction de différents paramètres. Bien qu'une grande variété d'algorithmes ait été conçue pour calculer le moment de déclenchement du signal (voir par exemple, McLaughlin, Hankey, Dingus, & Klauer, 2009; Seiler, Song, & Hedrick, 1998), la plupart d'entre eux sont basés sur deux approches générales : une approche cinématique ou une approche perceptuelle (Bella & Russo, 2011; Brown, Lee, & McGehee, 2001). L'approche cinématique détermine la distance minimale nécessaire pour arrêter le véhicule en conditions de sécurité. Pour cela, cet algorithme calcule certains paramètres spécifiques aux véhicules impliqués dans la possible collision, comme la vitesse, la position et la décélération. De plus, il incorpore également une estimation de deux paramètres spécifiques au conducteur qui peuvent influencer considérablement l'efficacité du signal : le temps de réaction et la force de décélération (McLaughlin, Hankey, & Dingus, 2007). L'approche perceptuelle est basée sur le temps avant que la collision se produise si la position et la vitesse actuelle des véhicules restent constantes. Actuellement, il n'y a pas une dominance claire d'un modèle sur l'autre, ni d'un algorithme sur un autre. Pratiquement chaque modèle de voiture a son propre algorithme ce qui se traduit par des temps d'alerte qui peuvent varier largement dans des conditions de trafic similaires. Une étude réalisée sur piste avec trois modèles différents de véhicules équipés d'un FCWS a estimé le temps à la collision avec le véhicule précédent à partir du moment où le signal avertisseur est déclenché (Forkenbrock & O'Harra, 2009). Bien que les conditions de simulation aient rempli les mêmes critères pour les trois véhicules, les prédictions du temps à la collision ont montré des différences allant jusqu'à 800 ms entre un modèle et un autre.

Le choix des paramètres appropriés dans la conception des systèmes anticollision est décisif pour l'efficacité du système et, par conséquent, pour le rejet ou l'acceptation par les conducteurs.

2.1.6. Systèmes réels sur le marché

De nombreux systèmes anticollision ont été conçus et introduits sur le marché (Forkenbrock & O'Harra, 2009; Grover et al., 2008; Schoitsch, 2008). En général, ils apparaissent intégrés à des systèmes de régulation de vitesse adaptatifs (systèmes qui maintiennent une vitesse et une distance de sécurité constante, Adaptive Cruise Control) car ils utilisent les informations fournies par les mêmes capteurs. La plupart des systèmes anticollision intégrés dans les véhicules comportent le système d'alerte (FCWS) et le système d'évitement de collisions (FCAS). Dans la première phase, le

système généralement active un signal auditif et visuel qui est suivie d'une phase de freinage autonome du véhicule, si le conducteur n'a pas réagi. Cette phase de freinage peut également être accompagnée de signaux auditifs, visuels voire tactiles (Campbell et al., 2007; Grover et al., 2008).

Actuellement, les capteurs des systèmes anticollision couvrent une distance comprise entre 100 et 200 m de long et détectent des obstacles situés dans un angle d'environ 16° dans le plan horizontal et 4° approximativement dans le plan vertical. Le système est activé à partir d'une certaine vitesse (autour de 10 ou 15 km/h). Il détecte tous les véhicules stationnaires apparaissant dans la même trajectoire du véhicule en question ainsi que les véhicules en mouvement, à l'exception de petits véhicules à deux roues. Le système peut ne pas fonctionner lorsque les capteurs sont totalement ou partiellement bloqués (par la neige, les salissures, etc.) ou lorsqu'un défaut est détecté. Dans ces cas, le système peut informer les conducteurs à travers des signaux visuels et éventuellement auditifs de cette interruption temporaire du système. De plus, le système peut ne pas être efficace dans certaines conditions, comme lorsque la distance inter-véhiculaire est trop petite, quand il y a des décélérations et accélérations brusques ou lors de changements soudains de trajectoire d'un véhicule. (European Commission, 2011; Grover et al., 2008; ISO 15623, 2002; SAE J2400, 2003).

2.1.7. Bénéfices du système

Au cours des dernières années, les systèmes d'alerte anticollision ont connu un rapide essor grâce à leur contribution positive dans le domaine de la sécurité routière. Pour cette raison, la Commission Européenne (2009) a récemment proposé l'installation obligatoire de systèmes avancés de freinage d'urgence (FCWS et FCAS) dans les véhicules lourds à partir du 1er Novembre 2013. Les véhicules légers seront exemptés pour le moment car le rapport coûts-bénéfices estimé est à l'heure actuelle inférieur par rapport aux véhicules lourds.

Bien que la plupart des études sur les systèmes anticollision soulignent leurs effets positifs, le pourcentage de bénéfices estimé peut varier en fonction des méthodologies utilisées. Ainsi, nous allons présenter les bénéfices estimés par la modélisation des données d'accidents réels par différents algorithmes, par des études réalisées sur simulateur de conduite ou sur piste, et par des données provenant des compagnies d'assurance. Enfin, nous parlerons de l'acceptation de ces systèmes par les conducteurs.

- Bénéfices estimés par modélisation. Ces techniques appliquent les différents algorithmes sur des données d'accidents de la vie réelle pour prédire le nombre d'accidents qui auraient pu être évités si le système avait été disponible. En utilisant cette méthode, Georgi, Zimmermann, Lich, Blank, Kickler et Marchthaler (2009) ont estimé que le FCWS pourrait éviter 38% des collisions et le FCAS 72%. De

plus, lorsqu'un accident est inévitable, la vitesse moyenne de collision est réduite de 9% pour le FCWS et de 25% pour le FCAS. Cependant, en fonction de la base de données utilisée, le bénéfice des systèmes anticollision peut varier considérablement. Ainsi, selon les données fournies par Zhu (2001) le pourcentage de réduction des collisions est plus élevé pour le système d'alerte (17%) que pour le système d'évitement (5%). Si le signal avertisseur est déclenché suffisamment à l'avance, le conducteur pourrait être capable d'éviter la collision par lui-même sans que le système d'évitement soit activé, ce qui pourrait expliquer ce résultat. Cependant, le bénéfice potentiel en termes de réduction de la mortalité reste plus élevé pour le système d'évitement que pour le système d'alerte (29% versus 24%, respectivement).

- Bénéfices estimés à partir des études sur simulateur de conduite. Les simulateurs de conduite ont été l'un des outils les plus fréquemment utilisés dans l'évaluation de l'efficacité des FCWS. Les bénéfices dans ces études ont montré, par exemple, une réduction du nombre de collisions (Lee, McGehee, Brown, & Reyes, 2002), des temps de réaction au freinage plus rapides suite à la détection de situations critiques dans des conditions de visibilité normales (Abe & Richardson, 2006) ou réduites (Harder et al., 2003) et l'adoption de distances de sécurité plus longues et plus sûres (Ben-Yaacov, Maltz, & Shinar, 2002).

- Bénéfices estimés à partir des études sur piste. L'efficacité de ces systèmes a été aussi analysée par des études réalisées en conditions plus écologiques. Par exemple, Najm et al. (2006) ont évalué l'impact d'un système anticollision et d'un système de régulation de la vitesse adaptatif (Adaptive Cruise Control) pendant quatre semaines lors d'une étude réalisée dans des conditions réelles de conduite (*Field Operational Test*). Les résultats ont indiqué que le taux des événements critiques, tels que l'exposition à des conflits et quasi-accidents, a été réduit d'environ 20% dans la dernière période par rapport à la première période d'utilisation du système. Avec les données de cette étude, les auteurs ont estimé en se basant sur différentes bases de données, que le système pourrait prévenir environ 10% des collisions par l'arrière.

- Bénéfices estimés à partir des données des compagnies d'assurance. Finalement, une autre façon d'estimer l'impact des systèmes anticollisions dans le monde réel peut se faire à travers l'analyse des déclarations faites aux compagnies d'assurance. Ainsi, une étude a analysé l'impact de plusieurs systèmes d'aide à la conduite sur le marché, en comparant le nombre de déclarations provenant d'usagers ayant un véhicule équipé de systèmes d'assistance à celles provenant d'usagers ayant un véhicule non équipé. Le système d'évitement de collisions s'est imposé comme l'un des systèmes présentant le plus de bénéfices, particulièrement, en termes de réduction des demandes d'indemnisation de dommages des véhicules. Le système d'alerte anticollision semble également réduire le taux d'accidents mais à une moindre échelle. Une des explications possibles à ce dernier résultat serait donnée par les différences entre les caractéristiques des deux systèmes. Par exemple, le système d'alerte anticollision commence à fonctionner à partir de 32 km/h alors que le système d'évitement commence à partir de 5 km/h. En général, bien que ces résultats soient positifs au sujet de l'utilisation de ces systèmes, ces données doivent être interprétées avec prudence en raison de certaines limitations. Notamment, l'état du système (actif ou inactif) au moment des accidents n'était

pas connu. De plus, les données ne rapportaient pas d'information détaillée concernant les conditions de la collision. Or, il est important de connaître certaines informations comme le point de collision afin d'estimer l'implication de chaque système dans chaque type de collision (Highway Loss Data Institute, 2012a, 2012b, 2012c).

Que ce soit à travers des études de modélisation des données, des expériences sur simulateur de conduite ou dans des conditions plus écologiques, ou à partir de données des assurances, tous ces résultats ont montré que le système anticollision a un effet positif. Le bénéfice fluctue d'environ 5 à 70% en fonction des différentes études, différents systèmes ou différentes caractéristiques des conducteurs.

- **Acceptation des systèmes anticollision par les conducteurs.** Le succès des systèmes anticollision ne dépend pas seulement de leur capacité à prévenir les accidents, mais aussi de l'acceptation du système par les conducteurs. Certains facteurs critiques comme, par exemple, un taux élevé de fausses alertes (Najm et al., 2006) ou une activation trop précoce de l'alerte (Abe & Richardson), peuvent amener les usagers à arrêter d'utiliser ces systèmes. Cependant, en dehors de ces éléments, l'assistance des systèmes anticollisions est évaluée positivement à la fois dans les études sur simulateur de conduite (Chun et al., 2012; Itoh, Horikome, & Inagaki) et dans les études sur route réelle (Najm et al., 2006). Les résultats d'une enquête avec 86 propriétaires de véhicules équipés d'un système anticollision (système d'alerte plus freinage autonome) ont révélé que 88% des conducteurs conduisaient toujours avec le système activé (Braitman, McCartt, Zuby, & Singer, 2010). La plupart ont déclaré avoir reçu au moins un signal avertisseur du système même si une grande partie de ces signaux n'ont pas été associés par les utilisateurs à un risque d'accident. Il est intéressant de noter que 46% des propriétaires ont constaté conduire avec des marges de sécurité plus grandes. Le potentiel de ce système en termes de sécurité et sa capacité à réduire le stress généré par la situation de conduite a été mis en évidence. Ces résultats ont ensuite été reproduits dans une autre enquête avec plus de 300 utilisateurs (Eichelberger & McCartt, 2012). Toutefois, dans ce cas, seulement 12% des conducteurs ont constaté conduire de façon plus sûre en respectant de plus grandes distances de sécurité.

2.1.8. Facteurs influençant l'efficacité des systèmes

Jusqu'à ici nous avons présenté les caractéristiques principales des systèmes anticollision ainsi que leurs bénéfices au niveau général. Cependant, l'efficacité de ces systèmes peut être modulée par certains facteurs. Nous allons maintenant introduire dans ce travail de thèse deux facteurs importants qui peuvent affecter l'efficacité des systèmes. En premier lieu, nous détaillons l'impact du niveau de

fiabilité et des erreurs du système sur le comportement des conducteurs. Ensuite, nous allons parler de l'impact des systèmes en fonction de l'état attentionnel des conducteurs : distraits et non distraits.

2.1.8.1. Fiabilité du système

Il est préconisé que l'information fournie aux conducteurs soit opportune et précise (European Commission, 1998). Cependant, à ce jour aucun système anticollision n'est fiable à 100%. En effet, selon le type d'algorithme et de capteur, le système peut mal fonctionner, produisant des défauts de détection des événements critiques et/ou des fausses alarmes. Les fausses alarmes se réfèrent à des situations dans lesquelles un signal avertisseur est déclenché en l'absence de risque de collision. Les défauts de détection se produisent lorsqu'un signal avertisseur n'est pas déclenché bien que la situation l'exigerait. Par ailleurs, certains signaux avertisseurs déclenchés lorsqu'une collision est effectivement imminente peuvent être inefficaces si ils sont perçus par les conducteurs comme inappropriés en raison de leur fréquence, le moment de déclenchement, leur intensité ou leur modalité (Abe & Richardson; Campbell et al., 2007; Lee et al., 2002; Lees, 2010).

Du fait de leur caractère irritant ou distrayant, un nombre trop élevé de fausses alarmes pourrait avoir pour conséquence que les utilisateurs ignorent ou réagissent de manière inappropriée à de nouveaux signaux avertisseurs (Lerner, Dekker, Steinberg, & Huey, 1996). De même, un taux très élevé de défauts de détections peut devenir critique pour l'acceptation et la confiance dans le système (Abe, Itoh, & Tanaka, 2002). Toutefois, les fausses alarmes et les non-détections n'ont pas toujours que des effets négatifs. Par exemple, si un système ne produit jamais de fausses alarmes, le premier déclenchement d'un signal correspondrait à un risque réel de collision. Puisque la probabilité d'avoir une collision par l'arrière est relativement faible, les conducteurs pourraient ne pas réagir de façon appropriée lors de ces situations (Parasuraman, Hancock, & Olofinboba, 1997). D'autre part, si un système détecte tous les possibles risques de collision, les conducteurs pourraient accorder trop de confiance au système et devenir vulnérables (Parasuraman et al., 1997), par exemple, si le système tombait en panne ou si ils devaient conduire un autre véhicule non équipé.

Il est donc nécessaire de trouver un seuil approprié entre le taux de fausses alarmes et de défauts de détections d'un système. Cependant, les efforts à ce regard n'ont pas été concluants (Kiefer et al., 1999; Lerner et al., 1996; Parasuraman et al., 1997). Nous ne disposons pas de données chiffrées claires sur les taux réels de fausses alarmes et de défauts de détection de collisions. Les résultats obtenus soit par des études réalisées sur piste (Najm et al., 2006; Stein, Solomon, & Ziedman, 1992), soit par de la modélisation à partir de vrais accidents (McLaughlin, 2007) ont montré une faible précision du système (entre 32 et 56%) et un pourcentage très élevé de fausses alarmes (environ

60%). Sachant qu'il est recommandé que le taux de signaux avertisseurs considérés comme une nuisance ne dépasse pas un signal pour 322 km parcourus (Kiefer et al., 1999), les données présentées ci-dessus ne paraissent pas très encourageantes.

D'autres études ont porté sur la fiabilité du système en se concentrant sur le pourcentage des alertes efficaces, sans préciser le nombre de fausses alarmes ou de défauts de détections. En général, plus le niveau de fiabilité est haut, meilleurs sont les résultats. Toutefois, le point où le système devient inefficace reste incertain. Bliss et Acton (2003) ont noté que les participants répondaient plus fréquemment au signal avertisseur et ils évitaient les collisions de façon plus appropriée lorsque l'alerte était fiable à 100% que lorsqu'elle était fiable à 75% ou 50%. Cependant, Cummings, Kilgore, Wang, Tijerine et Kochhar (2007) n'ont trouvé aucune différence dans les temps de réaction aux signaux déclenchés par un système de fiabilité faible (25% des signaux correctes, 75% de fausses alarmes) par rapport à un système de haute fiabilité (75% des signaux correctes, 25% de fausses alarmes). Toutefois, le pourcentage de réponses correctes (réagir à de possibles collisions et ne pas réagir lorsqu'il s'agit de fausses alarmes) était réduit avec le système moins fiable. Néanmoins, Maltz et Shinar (2004) et Ben-Yaacov et al. (2002) n'ont pas trouvé de différences entre des systèmes fiables à 60, 80-85, et 90-95%. Wickens et Dixon (2007) ont effectué une méta-analyse portant sur 22 études qui ont examiné des systèmes d'automatisation imparfaits. Ils ont conclu qu'un niveau de fiabilité de 70% pourrait être le critère à partir duquel un système peut être considéré comme étant efficace.

2.1.8.2. Impact de l'état attentionnel des conducteurs

Comme il a été mentionné précédemment, la principale cause des collisions par l'arrière est la distraction du conducteur. Dans ce type de situations les ressources attentionnelles du conducteur peuvent être réduites par les demandes de la tâche secondaire. C'est donc dans ces conditions, que les FCWS devraient être particulièrement utiles pour aider les conducteurs à anticiper des événements dangereux et à réagir plus rapidement.

La plupart des études présentées plus haut ont évalué les effets de ces systèmes chez les conducteurs non distraits. Nous pouvons nous interroger maintenant sur les études évaluant l'efficacité du système uniquement chez les conducteurs distraits. Les données existantes obtenues sur simulateurs de conduite ont montré que les conducteurs distraits peuvent également bénéficier des systèmes d'alerte anticollision.

Tableau 2. Récapitulatif des études illustrant les effets du système anticollision chez les conducteurs distraits.

ÉTUDE	CONTEXTE	TYPE DE DOUBLE TÂCHE	TYPE DE SIGNAL AVERTISSEUR	EFFETS POSITIFS DU SYSTÈME	EFFETS NÉGATIFS/NEUTRES DU SYSTÈME
Maltz et Shinar (2007)	FCWS Simulateur	Visuelle (Détection des changements des cibles présentées dans la périphérie)	Auditif	Plus de temps avec des distances de sécurité plus larges	
				Moins de temps avec des distances de sécurité moins sûres	
Chun et al. (2012)	FCWS Simulateur	Visuo-motrice (Introduction d'un code de 7 chiffres sur un écran)	Tactile	Temps de réaction plus rapides	Prévention d'accidents
Murher et al. (2012)	FCWS + FCAS Simulateur	Visuo-motrice (Identification sur un écran d'une cible parmi 100 distracteurs)	Auditif+Visuel	Prévention d'accidents	Pas de bénéfices au niveau des temps de réaction, distance de sécurité et décélération
					Augmentation de la vitesse
					Plus de regards et plus longues au tableau de bord
Kiefer et al. (2005)	FCWS Piste	Visuo-motrice (Insérer une série de chiffres dans un téléphone)	Auditif+Visuel	Moins d'interventions par l'expérimentateur (frein, volant)	Aucune intervention a été nécessaire
				Temps de réaction plus rapides	
				Distance de sécurité plus larges	
				Décélérations plus progressives et moins brusques	
		Cognitive (e.g. "A précède B", "BA", vrai ou faux?)			
					Pas de bénéfices au niveau de temps de réaction ni décélération
					Distances de sécurité plus courtes

En général, ces études ont mis en évidence des résultats positifs du système en utilisant des tâches secondaires à caractère visuel (voir Tableau 2). Ainsi, les résultats de Maltz et Shinar (2007) ont montré que les participants distraits qui conduisaient avec l'aide d'un signal avertisseur auditif, passaient plus de temps avec des marges de sécurité plus sûres (> 1 seconde) et moins avec des marges moins sûres (< 1 seconde) que les participants qui ne disposaient pas du système. De même, Chun et al. (2012) ont trouvé que la présence d'un signal tactile aidait les participants distraits à réagir plus rapidement aux décélérations brusques du véhicule précédent et à éviter plus d'accidents que lorsque le signal n'était pas disponible. Au contraire, les résultats de Muhrer, Reinprecht et Vollrath (2012) utilisant un système d'alerte couplé à un système d'évitement des collisions (signal auditif et visuel), n'ont pas observé de bénéfice avec le système que ce soit au niveau des temps de réaction, des distances inter-véhiculaires ou des taux de décélérations. Leurs résultats ont montré certains effets négatifs du système se traduisant par une légère augmentation de la vitesse et une augmentation de la fréquence des regards vers le tableau de bord. Cependant, l'effet du système a été globalement positif car aucun accident n'a été signalé pour les participants disposant du système, contrairement à ceux conduisant sans système. Enfin, Kiefer, Cassar, Flannagan, Jerome et Palmer (2005) ont montré le bénéfice d'un FCWS composé d'un signal auditif et visuel dans des conditions de conduite plus réalistes (sur piste). Cependant, leurs résultats dépendent du type de tâche secondaire

réalisé par les participants. Le système a été efficace lorsque les participants ont réalisé une tâche de distraction visuo-motrice. En revanche, le système n'a pas montré d'effets positifs lorsque les participants réalisaient une tâche de distraction cognitive. Il faut noter, cependant, qu'aucune intervention par l'expérimentateur n'a été nécessaire dans cette condition.

De façon plus intéressante, en plus d'observer l'efficacité de ces systèmes uniquement chez les conducteurs distraits, d'autres auteurs ont comparé les effets des systèmes chez les conducteurs distraits et non distraits. En général, la plupart de ces études menées dans un simulateur ont montré un bénéfice similaire pour les conducteurs distraits et pour les conducteurs non distraits, mais de nouveau avec une forte propension à utiliser des tâches secondaires visuelles ou visuo-motrices (voir Tableau 3).

Tableau 3. Récapitulatif des études illustrant les effets du système anticollision chez les conducteurs distraits et non distraits.

ÉTUDE	CONTEXTE	TYPE DE TÂCHE DISTRACTIVE	TYPE DE SIGNAL AVERTISSEUR	EFFETS DU SYSTÈME CHEZ LES CONDUCTEURS DISTRAITS	EFFETS DU SYSTÈME CHEZ LES CONDUCTEURS NON DISTRAITS
Ho et Spence (2009)	FCWS Simulateur simplifié	Visuelle (Regarder à la périphérie)	Auditif	Temps de réaction plus rapides	
				Plus de détections au freinage du véhicule	
Kramer et al. (2007)	FCWS Simulateur	Visuo-motrice (Introduction d'un code de 7 chiffres sur un écran)	Auditif+Visuel	Temps de réaction plus rapides	
				Prévention d'accidents	
Lee et al. (2002)	FCWS Simulateur	Visuelle (Identifier le nombre de fois que le numéro 4 apparaissait sur un écran)	Auditif+Visuel	Distance de sécurité plus larges	
				Temps de réaction plus rapides	
				Décélérations plus progressives	
				Prévention d'accidents	Prévention d'accidents (bénéfice plus important)
				Réduction de la vitesse de l'impact	Réduction de la vitesse de l'impact (bénéfice plus important)
Abe et al. (2011)	FCWS Simulateur	Visuo-cognitive (Additionner 4 chiffres présentés sur un écran et entrer le résultat)	Auditif	Distance de sécurité plus larges	Pas de bénéfice
				Évaluation des signaux avertisseur comme nécessaire	Évaluation des signaux avertisseur comme non nécessaire
Mohebbi et Gray (2009)	FCWS Simulateur	Cognitive (Conversation simple: questions démographiques et personnelles)	Tactile	Plus de bénéfices (*)	Plus de bénéfices avec les 2 signaux (*)
			Auditif	Moins de bénéfices (*)	
		Cognitive (Conversation complexe: calcul mental et questions de catégorisation)	Tactile	Temps de réaction plus rapides	
			Auditif	Pas de bénéfice	

* Ces résultats ne sont pas explicitement discutés dans l'article et sont issus de l'observation des données graphiques de l'article

Par exemple, Ho et Spence (2009) ont constaté que les participants distraits et non distraits bénéficiaient de façon similaire du signal d'alerte auditif en termes de temps de réactions et de réponses correctes. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de Kramer et al. (2007) utilisant un signal auditif et visuel et, de plus, ils ont trouvé un bénéfice en termes de diminution des collisions. De même, Lee et collaborateurs (2002) ont montré l'effet positif d'un FCWS de type auditif et visuel lorsque les conducteurs étaient distraits et non distraits. Précisément, leurs résultats ont montré des marges de sécurité plus larges, des temps de réaction plus rapides et des décélérations plus progressives lorsque le système était disponible. En outre, le système a également eu un impact en réduisant le nombre de collisions ainsi que la vitesse à l'impact, ce bénéfice étant plus important pour les conducteurs distraits que pour les non distraits.

Contrairement à ces résultats, l'étude de Abe, Itoh et Yamamura (2011) a montré des bénéfices d'un signal auditif uniquement chez les conducteurs distraits. Cependant, les auteurs ont suggéré que ce résultat pourrait être expliqué par des conditions de trafic intense où la haute fréquence de déclenchement du signal pourrait être perçue comme non nécessaire. Les données subjectives ont confirmé cette idée, montrant que les conducteurs non distraits évaluaient les signaux avertisseurs comme non nécessaires, contrairement aux conducteurs distraits. Ainsi, il semble que les conducteurs distraits essayaient de compenser leur manque de ressources attentionnelles à l'aide du système même dans des conditions de trafic intense qui permettaient de mieux anticiper le comportement du véhicule précédent.

Finalement, l'expérience de Mohebbi, Gray et Tan (2009) est particulièrement intéressante car elle montre que les bénéfices du système peuvent varier en fonction du type de signal et en fonction du type de tâche secondaire. À la différence des autres études, ces auteurs ont analysé l'efficacité de deux signaux avertisseurs différents, un auditif et un autre tactile, mais en utilisant une tâche de distraction cognitive et non visuelle. De plus, deux niveaux de difficulté de la double tâche (simple et complexe) ont été manipulés. Leurs résultats ont montré que lorsque les participants étaient engagés dans une conversation complexe, seul le signal tactile était efficace mais pas le signal auditif. Les comparaisons entre les différents signaux selon les conditions sans distraction et avec distraction simple, n'ont pas été détaillées dans l'article. Cependant, graphiquement il semblerait que le bénéfice soit aussi plus important pour le signal tactile que pour le signal auditif dans la condition de distraction simple, tandis qu'il n'y aurait pas de différences entre les deux signaux dans la condition sans distraction.

Au vu de cette revue de la littérature, il semble donc que selon le type de tâche secondaire, différents signaux d'avertissement n'aient pas les mêmes effets.

2.1.9. Adaptation comportementale au système

L'adaptation comportementale a été définie comme « ces comportements qui peuvent survenir suite à l'introduction de changements dans le système route-véhicule-utilisateur et qui ne sont pas attendus par l'initiateur du changement » (OECD, 1990). Compte tenu de sa possible répercussion sur la sécurité routière, l'étude de l'adaptation comportementale à un système s'est focalisée sur les adaptations ayant un caractère négatif. Cependant, une vision plus large pourrait être adoptée en tenant compte également de toutes les modifications pertinentes positives liées à l'introduction du système (Saad et al., 2004).

Les changements de comportement peuvent apparaître au cours des premiers contacts avec le système (phase d'apprentissage) lorsque les conducteurs apprennent comment fonctionne le système, mais aussi après une longue période d'exposition (phase d'intégration) une fois que les conducteurs ont acquis un plus grand niveau d'expérience avec le système (Saad et al., 2004).

Bien que les ADAS aient été conçus pour assister les conducteurs dans la tâche de conduite, ils peuvent également modifier négativement le comportement des conducteurs. Par exemple, si les conducteurs accordent trop de confiance au système, ils pourraient réduire la surveillance ou le contrôle de certaines sous-tâches de la conduite. De plus, ils pourraient s'engager dans plus de tâches secondaires, voire adopter plus de comportements à risque.

En ce qui concerne l'usage du FCWS, la plupart des résultats ont été obtenus après une brève exposition au système dans des études à court terme. Comme il a été mentionné antérieurement, les résultats de ces études ont montré un effet positif global du système. De plus, il semble que les conducteurs ne montrent pas plus d'engagement dans des tâches secondaires lorsqu'ils conduisent avec le système. Kidd, Nelson et Baldwin (2010) ont demandé aux participants de conduire à l'aide d'un système d'alerte anticollision en même temps qu'ils réalisaient une tâche secondaire visuo-motrice (taper des séquences de chiffres précédemment données sur un écran). Ces auteurs ont constaté que, contrairement à la période antérieure au déclenchement du signal avertisseur, les participants ayant reçu un signal ont pris plus de temps à initier de nouveau la tâche secondaire, ainsi qu'à valider leurs réponses. De plus, Muhrer, Reinprecht et Vollrath (2012) ont conclu à partir d'une étude réalisée dans un simulateur de conduite que conduire avec un système anticollision (signal avertisseur plus freinage autonome) n'incite pas plus les conducteurs à s'engager dans une tâche secondaire. L'analyse des mouvements oculaires ainsi que celle des temps de réaction et du nombre de réponses à la tâche secondaire n'ont montré aucune différence entre les participants qui ont conduit avec et sans le système. Cependant, l'adaptation au système peut être affectée par certaines caractéristiques du système (e.g., le moment de déclenchement du signal avertisseur, le niveau de fiabilité, etc.) comme il a été montré précédemment. De plus, d'autres facteurs liés au conducteur peuvent également influencer l'adaptation comportementale à ces systèmes tels que les attitudes et

traits de personnalité et même les attentes que les conducteurs ont en ce qui concerne le comportement du véhicule précédent.

Selon le modèle de Rudin-Brown and Noy (2002), l'adaptation comportementale peut être influencée par des variables de personnalité comme le locus de contrôle (e.g., la tendance à considérer que les événements qui nous affectent sont le résultat de nos propres actions, locus de contrôle interne ou, au contraire, qu'ils sont le fait de facteurs externes, locus de contrôle externe), la recherche de sensations intenses et variées et la prise de risque pour les obtenir. Ainsi, par exemple, une personne avec un locus de contrôle externe pourrait être plus prédisposée à utiliser le système mais aussi pourrait être plus vulnérable aux possible défaillances du système car elle s'appuierait moins sur ses propres habilités, contrairement à une personne avec un locus de contrôle interne. D'autre part, une personne qui recherche de nouvelles sensations pourrait montrer plus d'adaptations négatives au système, par exemple, en s'engageant dans plus de tâches secondaires (Rudin-Brown & Parker, 2004). Bien que l'influence du style du conducteur sur l'efficacité du FCWS n'ait été que peu étudiée, les résultats existants n'indiquent pas une forte influence de ce facteur. Jamson, Lai et Carsten (2008) ont mené une étude sur simulateur de conduite pour analyser les avantages d'un FCWS en tenant compte du style du conducteur (recherche de sensations, préférence pour la distance de sécurité et temps de réactions individuels). Leurs résultats ont indiqué que le style du conducteur a eu peu ou aucun impact sur la réaction aux décélérations du véhicule précédent. Seuls les conducteurs qui avaient tendance à conduire avec des marges de sécurité plus petites ont montré des temps de réaction plus rapides lorsque le système était disponible, les conducteurs qui adoptaient des distances plus longues n'ayant montré aucune différence.

Finalement, les attentes des conducteurs, en ce qui concerne le comportement du véhicule précédent, peuvent également influencer leur propre comportement. La plupart des collisions par l'arrière se produisent dans des circonstances de trafic « normales » (ligne droite, trafic fluide, etc.) dans lesquelles il est difficile de prévoir un freinage soudain du véhicule précédent. Cela a conduit Muhrer et Vollrath (2010) à faire l'hypothèse que les conducteurs pourraient ne pas maintenir des marges de sécurité adaptés à chaque situation, car l'attente d'un freinage brusque du véhicule précédent est très faible. Cependant, si les conducteurs ont été précédemment exposés à un nombre élevés de décélérations, ils pourraient modifier leurs attentes quant au comportement du véhicule précédent (voir par exemple, Abe et al., 2011; Lee et al., 2002; Muhrer & Vollrath, 2010; Muhrer et al., 2012).

En général, les études présentées ci-dessus sur les facteurs qui peuvent influencer l'adaptation du conducteur au FCWS ont été réalisées sur de courtes périodes de temps. Elles ont principalement analysé l'impact du système lors de la phase d'apprentissage, c'est-à-dire, pendant les premières utilisations du système. Cependant, la plupart de ces études ont utilisé la technique du contrebalancement au cours de laquelle les périodes avec et sans système sont présentées dans un ordre aléatoire. Par conséquent, à l'heure actuelle, la façon dont les conducteurs adaptent leur comportement au système lors des premières utilisations (phase d'apprentissage et d'appropriation), mais aussi après une utilisation plus prolongée (phase d'intégration) nécessite d'être mieux étudiée.

Enfin, au-delà de l'adaptation au système, il est intéressant d'évaluer comment les conducteurs pourraient réagir si le système n'est plus disponible (par exemple, par un dysfonctionnement du système) aussi bien après une courte période d'utilisation du système qu'après une longue période d'utilisation. Si les conducteurs sont devenus dépendants de l'aide du système, ils pourraient être très vulnérables en cas de dangers potentiels si le système n'est plus disponible. Toutefois, si les conducteurs considèrent le système comme un assistant et non comme un substitut du conducteur, ils pourraient être capables de transférer l'effet positif du système, même quand il n'est plus disponible. Une seule étude à notre connaissance a été réalisée en vue d'examiner l'effet à long terme d'un FCWS sur le comportement de conduite (Ben-Yaacov et al., 2002). Celle-ci a été réalisée dans des conditions de conduite réelle. Dans cette étude, les participants devaient conduire dans des conditions réelles de circulation au cours de 4 périodes : avec (2^{ème} période) et sans le système (1^{ère} et 3^{ème} périodes et 4^{ème} période six mois plus tard). Les conducteurs ont adopté des marges de sécurité plus importantes immédiatement après l'exposition au système (3^{ème} période). Fait intéressant, cet effet a également été observé six mois plus tard, lorsque les participants ont de nouveau été exposés au même circuit et sans l'assistance du système d'alerte.

2.2. Modèles cognitifs et processus attentionnels en conduite automobile

Dans cette partie nous allons décrire les modèles classiques et plus actuels de l'attention, incluant la présentation de la notion de signal avertisseur qui est un concept central dans cette thèse. Par ailleurs, nous présenterons quelques modèles cognitifs de la conduite ainsi que les conséquences de la distraction en termes de double tâche dans le domaine de la conduite.

2.2.1. Théories cognitives sur le traitement de l'information

2.2.1.1. L'attention comme un filtre sélectif

Les premiers modèles cognitifs sur l'attention ont porté sur les aspects sélectifs de l'attention. Ce concept de sélectivité de l'attention a été illustré pour la première fois dans le modèle de filtre sélectif de Broadbent (1958). Selon ce modèle, du fait de notre capacité attentionnelle limitée, nous ne pouvons traiter qu'une seule information à la fois. L'existence d'un filtre est donc essentielle afin de sélectionner cette information parmi le flux d'information continu que nous recevons en provenance de notre environnement. Cette information est filtrée en fonction des caractéristiques physiques des stimuli. Ainsi, le filtre apparaît à un stade précoce du traitement de l'information où seulement l'information attendue serait filtrée pour être traitée ultérieurement. Ces concepts ont été modifiés par des modèles postérieurs. Plus précisément, il a été proposé que le processus de sélection de l'information aurait lieu plus tardivement (au niveau de la réponse) (Deutsch & Deutsch, 1963) et que le filtre agirait plutôt comme un atténuateur de l'information non pertinente (Treisman, 1964). Cependant, la notion de sélectivité dans le traitement de l'information, n'a pas été remise en question.

A l'heure actuelle, l'attention sélective (ou focalisée) peut être définie comme la capacité à traiter un stimulus pertinent pour la tâche en cours tout en inhibant le traitement d'autres stimuli non pertinents présentés en simultané. Cette définition suggère que l'attention dirigée vers un stimulus se fait au détriment d'un autre (Coull, 1998).

2.2.1.2. L'attention comme un réservoir de ressources

À partir des années 70, ont émergés une série de modèles considérant l'attention comme un réservoir de ressources de traitement ayant une capacité limitée. Selon la théorie de Kahneman (1973), l'attention est un processeur central à capacité limitée. Lorsque les ressources attentionnelles nécessaires pour la réalisation d'une ou plusieurs tâches sont plus importantes que celles disponibles, une détérioration de la performance peut être observée. Ainsi, ce modèle met en relation la capacité des sujets et les caractéristiques de la tâche. Le processeur central est responsable de la distribution des ressources attentionnelles en fonction des règles permanentes (i.e., motivation, nouveauté), des intentions momentanées, du niveau de difficulté de la tâche et du niveau d'arousal.

Ce modèle a été complété par la notion du contrôle de traitement de l'information et la distinction entre un traitement automatisé ou un traitement contrôlé. Dans cette ligne, Posner et Snyder (1975) ont défini le traitement automatique comme un processus involontaire et inconscient qui n'interfère pas avec toute autre activité mentale continue. A l'inverse, le traitement contrôlé est volontaire, conscient et interfère avec une activité mentale concurrente. Par la suite, Schneider et Shiffrin (1977) ont ajouté que le traitement automatique est rapide, parallèle et inflexible et nécessite peu de ressources attentionnelles, contrairement au traitement contrôlé. Cependant, malgré les différences, ces deux processus ne sont pas considérés comme indépendants, mais seraient sur un même continuum. Les tâches de la vie quotidienne présentent toutes un ensemble de composantes automatiques et de composantes contrôlées.

La notion de contrôle de l'attention a été reprise dans le modèle de Norman et Shallice (1986) (voir Figure 1). Le centre de ce modèle est occupé par les *schémas*, qui sont des unités contrôlant les actions. Ces schémas peuvent être activés à partir des informations en provenance des sources internes ou externes à l'organisme. Un système de contrôle qui assure la sélection des unités appropriées est donc nécessaire. Le *gestionnaire des priorités de déroulement* intervient de façon passive et s'occupe de la coordination des schémas les plus pertinents dans des situations familières ou routinières. Il permet de gérer la compétition entre les schémas qui peuvent être activés mais qui ne sont pas compatibles. Lorsque la sélection des schémas n'est pas suffisante pour satisfaire les demandes d'une tâche, intervient un deuxième mécanisme appelé le *système attentionnel de supervision* (SAS). Ce système est particulièrement important pour répondre à des situations nouvelles ou très complexes.

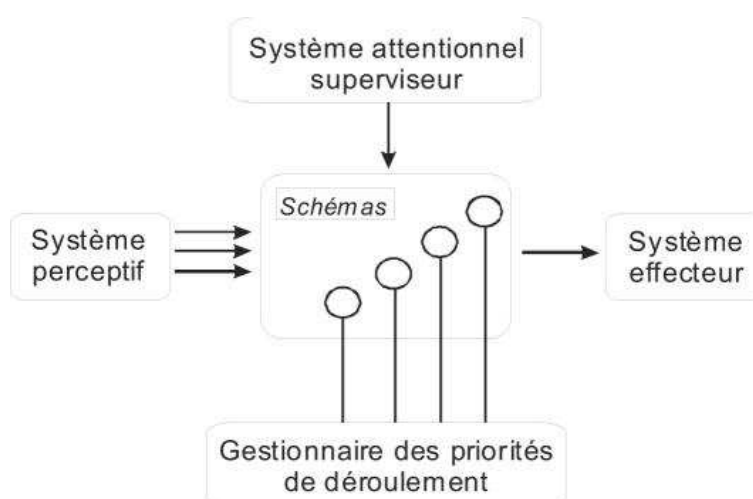


Figure 1. Modèle cognitif de Norman et Shallice (1986)

La notion de *système attentionnel superviseur* comme processeur central est comparable à la notion de *centre exécutif* proposée par Baddeley (1974; 2000) (voir Figure 2). Selon ce modèle il existe trois

sous-composantes, correspondant à des modules de traitement spécialisés, qui sont coordonnées par le centre exécutif. La *boucle phonologique* et le calepin *visuo-spatial* s'occupent de l'information verbale et visuo-spatiale, respectivement. Le *buffer épisodique* intègre l'information de divers contenus (verbal, visuel, spatial) et a accès à l'information en provenance de la mémoire à long terme.

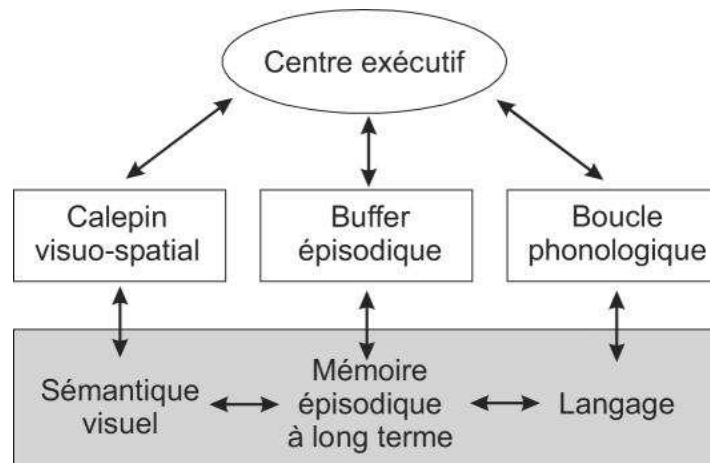


Figure 2. Modèle du « centre exécutif » de Baddeley (1974 ; 2000)

Ces approches modulaires ont été étendues dans le modèle de ressources multiples de Wickens (1984, 2002). Ce dernier reprend de Khaneman l'idée de ressources limitées, mais elles sont éclatées dans un système de réservoirs multiples et indépendants basés sur trois dimensions : les étapes du traitement, les modalités perceptives et les codes du traitement (voir Figure 3).

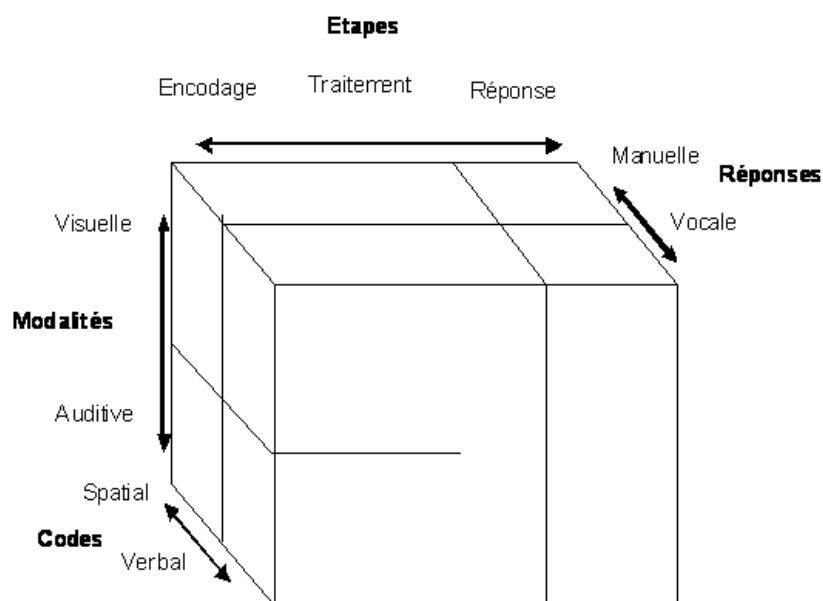


Figure 3. Le modèle de ressources multiples de Wickens (1984)

- La dimension des étapes du traitement indique que les ressources utilisées pour les tâches perceptives et cognitives sont différentes de celles nécessaires pour la sélection et l'exécution de la réponse. Par exemple, pour un contrôleur aérien, le fait d'ajouter une confirmation vocale ou manuelle de chaque changement d'état de l'avion (réponse), ne perturberait pas sa capacité à maintenir une image mentale précise de l'espace aérien (demandes perceptuelle et cognitive). Cependant, selon cette dimension, il y aurait une plus grande interférence entre les tâches nécessitant des ressources perceptives et cognitives. En effet, même si elles représentent des stades différents du traitement de l'information, les deux s'appuient sur des ressources communes. Par exemple, réaliser une tâche de recherche visuelle et une tâche de rotation mentale pourraient nécessiter les mêmes ressources et produire donc une plus grande interférence.

- La dimension des modalités est uniquement associée à l'étape perceptive et indique que la perception auditive utilise des ressources différentes de la perception visuelle. En conséquence, la présentation inter-modale de deux tâches (par exemple, visuelle et auditive) produira moins d'interférence qu'une présentation intra-modale (par exemple, deux tâches visuelles ou deux tâches auditives).

- La dimension des codes de traitement indique que les ressources concernant les activités spatiales sont différentes de celles qui concernent les activités verbales ou linguistiques aussi bien à un niveau perceptif, cognitif qu'au niveau de la réponse. La confirmation de cette distinction serait démontrée par la relative efficacité avec laquelle les réponses manuelles (habituellement de nature spatiale) et vocales peuvent être réalisées simultanément. Par contre, le contrôle manuel pourrait perturber la performance des tâches coûteuses au niveau spatial, tandis que le contrôle verbal pourrait perturber la performance de tâches verbalement coûteuses.

Selon le principe de base de ce modèle, deux tâches concurrentes seront réalisées de manière plus efficace si elles ne requièrent pas le même niveau d'une dimension donnée que si elles utilisent des structures communes. Ainsi, le modèle est capable de prévoir le niveau de performance lorsque deux tâches ou plus sont réalisées simultanément. Cependant, cette interprétation n'implique pas que deux tâches utilisant différents types de ressources peuvent être réalisées en même temps sans aucune interférence, en particulier si les demandes en ressources d'une ou des deux tâches sont élevées. En définitive, selon ce modèle, les ressources nécessaires (niveau de difficulté) comme les multiples aspects ou dimensions d'une ou plusieurs tâches peuvent affecter la performance.

2.2.2. Modèles attentionnels

Les modèles sur le traitement de l'information présentés dans la section antérieure ont été à la base des théories plus récentes sur l'attention. Nous allons privilégier ici deux modèles attentionnels qui ont exploré l'un des concepts les plus importants dans le cadre de cette thèse : la notion du signal avertisseur. Nous allons présenter le modèle de Posner et Petersen (1990), d'abord, et le modèle de Van Zomeren et Brouwer (Van Zomeren & Brouwer, 1994), par la suite.

Le modèle de Posner et Petersen (1990) postule l'existence de trois réseaux neuronaux relativement indépendants qui seraient à la base du contrôle attentionnel : le réseau du contrôle exécutif, le réseau d'orientation et le réseau d'alerte.

- Le réseau du contrôle exécutif intervient dans des situations de conflit (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002), comme par exemple dans la tâche de Stroop (Stroop, 1935).

- Le réseau d'orientation vise à diriger l'attention sélectivement vers les localisations pertinentes de la scène visuelle (Callejas, Lupiañez, Funes, & Tudela, 2005). L'une des tâches les plus utilisées pour évaluer cette fonction consiste en la présentation soudaine d'un signal dans la position où la cible sera présentée postérieurement (Posner, 2008).

- Le réseau d'alerte est défini comme un état de haute sensibilité aux stimuli à venir qui est accompagné de changements au niveau physiologique de l'organisme (Posner, 2008). Posner souligne qu'une importante fonction de ce réseau est la capacité de préparation et de maintenance de la vigilance pour traiter les signaux pertinents (Posner & Petersen, 1990). Dans ce cadre, deux niveaux d'alerte ont été proposés, l'alerte tonique et l'alerte phasique :

- L'état d'alerte tonique est modulé par les rythmes circadiens et est souvent mesuré dans des tâches longues et monotones (Posner, 2008).

- L'alerte phasique, quant à elle, correspond à une préparation de la réponse aux stimuli et ce pendant une courte durée (Sturm & Willmes, 2000). L'utilisation d'un signal avertisseur (par exemple un signal sonore) est une méthode permettant d'étudier l'alerte phasique. Le signal avertisseur déclenché avant la présentation d'une cible produit un changement au niveau de l'organisme qui se prépare pour donner une réponse rapide (Posner, 2008).

Le modèle de Van Zomeren et Brouwer (1994) est un modèle de l'attention qui intègre des concepts attentionnels proposés par Posner (Posner & Rafal, 1987), Kahneman (1973) et Norman et Shallice (1986). Ainsi, les auteurs ont catégorisé l'attention en trois composantes : les aspects d'intensité, de sélectivité et de contrôle.

- L'intensité, représente l'état d'alerte et inclut la distinction entre alerte phasique et tonique précédemment décrites, et l'attention soutenue ou vigilance. L'attention soutenue est l'habilité à maintenir l'attention pendant une durée prolongée. Bien que l'attention soutenue soit souvent utilisée comme synonyme de vigilance, ces deux concepts peuvent être différenciés par la fréquence de la

présentation des cibles : plus faible dans les situations de vigilance et plus élevée dans des tâches impliquant l'attention soutenue.

- La sélectivité, représente l'attention sélective ou focalisée et l'attention divisée ou partagée qui ont été précédemment décrites.
- Le contrôle permet de déplacer volontairement l'attention (flexibilité). Cette dimension module les aspects d'intensité et de sélectivité de l'attention et agit de façon similaire au système attentionnel de supervision du modèle de Norman et Shallice (1986).

2.2.2.1. Le rôle du signal avertisseur

Le modèle de Posner et Petersen (1990) et le modèle de Van Zomerén et Brouwer (Van Zomerén & Brouwer, 1994) présentés précédemment, ont introduit la notion d'alerte phasique qui peut être déclenchée par un signal avertisseur. Ici nous allons décrire plus en détail le fonctionnement de ce signal ainsi que son rôle spécifique dans le comportement et le traitement de l'information.

L'amélioration des temps de réaction à une cible par la présentation préalable d'un signal avertisseur a été l'un des phénomènes les plus étudiés en psychologie cognitive (Hackley & Valle-Inclán, 2003; Rudell & Hu, 2001). Cette amélioration des temps de réaction est accompagnée de changements au niveau physiologique de l'organisme, en particulier par le neurotransmetteur norépinephrine (Posner, 2008).

La fonction d'activation générée par le signal avertisseur semble dépendre de régions de l'hémisphère droit (Posner & Petersen, 1990; Sturm & Willmes, 2000). De plus, certaines régions de l'hémisphère gauche, liées probablement aux processus d'attention sélective ou d'inhibition, pourraient être également impliquées (Sturm & Willmes, 2000).

L'activation générée par le signal avertisseur déclenché avant la présentation d'une cible semble être liée au processus d'arousal et d'attente temporelle (Bueno & Ribeiro-do-Valle, 2012). L'arousal est l'état de réactivité du sujet qui peut varier d'un état d'excitation à un état de sommeil (Coull, 1998). L'attente temporelle, quant à elle, est un processus de préparation de réponse à la cible qui peut être modulé par la présentation de signaux temporellement prédictifs de l'apparition de la cible, en fonction des expériences préalables avec ces signaux (Correa, Triviño, Pérez-Dueñas, Acosta, & Lupiáñez, 2010).

Bien que le rôle du signal avertisseur au niveau comportemental ait été largement démontré, identifier à quel niveau du traitement de l'information intervient ce signal reste un sujet de polémique. Le débat porte sur le niveau de traitement qui est influencé par le signal, au niveau sensoriel ou perceptif, au niveau de la sélection de la réponse, ou encore au niveau moteur (Boulinguez, Jaffard, Granjon, & Benraiss, 2008; Fecteau & Munoz, 2007; Fischer, Plessow, & Kiesel, 2012; Hackley & Valle-Inclán,

2003; Rudell & Hu, 2001). Bien que ce débat ne soit pas encore tranché, un certain nombre d'arguments suggèrent que le rôle du signal avertisseur pourrait agir dans les étapes préalables à la réponse motrice.

Le bénéfice de la présentation d'un signal avertisseur en termes de temps de réponse plus rapide à la cible est cependant accompagné par une augmentation du taux des erreurs (Posner & Petersen, 1990). Ainsi, le signal opérerait en accélérant le processus de sélection de la réponse à la cible plutôt qu'en améliorant l'information en provenance de la cible (Posner, 1994, 2008). Posner a suggéré que le réseau d'alerte agirait en inhibant le réseau de contrôle exécutif pour « nettoyer la conscience », par exemple, des pensées qui pourraient interférer avec la détection de la cible (Posner & Petersen, 1990). L'interaction entre ces deux réseaux a été démontrée à travers des études de neuroimagerie (Cohen et al., 1988) et des études comportementales (Callejas et al., 2005; Funes & Lupiañez, 2003).

Dans la même idée, d'autres études utilisant la technique de l'électroencéphalographie (EEG) ont confirmé l'hypothèse selon laquelle le signal avertisseur faciliterait la sélection de la réponse. Brièvement, l'EEG est une technique d'analyse de l'activité électrique du cerveau qui permet de dissocier les différentes étapes du traitement de l'information. En utilisant cette méthode, Hackley et Valle-Inclan (2003) ont analysé le potentiel de préparation latéralisée (*Lateralized Readiness Potential*) qui est une composante observée lors de la préparation motrice d'une réponse (Luck, 2005). Leurs résultats ont montré que la présentation d'un signal avertisseur accélérerait le traitement de l'information du stimulus présenté mais pas de la réponse donnée. Ce résultat a été interprété comme une évidence en faveur de l'intervention du signal dans les étapes préalables au processus de sélection de la réponse.

Correa, Lupiañez, Madrid et Tudela (2006) après avoir réalisé une revue de la littérature, ont conclu que l'attente temporelle générée par le signal avertisseur module des composantes tardives liées aux processus moteurs et à la prise de décision (composantes N2 et P3). Cependant, l'implication du signal dans des étapes plus précoces du traitement de l'information sensoriel (composantes P1 et N1) est moins certaine. Ces auteurs ont postulé que l'usage des tâches coûteuses au niveau perceptif pourrait mettre en évidence l'effet du signal au niveau sensoriel. Ainsi, dans une étude réalisée avec une tâche de discrimination de lettres, ils ont trouvé un effet modulateur à la fois aux étapes du traitement sensoriel et au niveau du traitement moteur.

2.2.3. Modèles cognitifs de la conduite

La conduite automobile est une activité très complexe impliquant des capacités perceptives, motrices et cognitives. Le conducteur doit ainsi « monitorer » en permanence l'information en provenance de l'environnement, de son propre corps et du véhicule, sélectionner les informations pertinentes pour la tâche de conduite pour, enfin, prendre des décisions adaptées à chaque situation.

Certains modèles du fonctionnement du conducteur ont essayé de clarifier la complexité de l'activité de conduite. Les principaux modèles proviennent des modèles hiérarchiques du contrôle cognitif et des modèles motivationnels.

Selon les modèles hiérarchiques, plusieurs niveaux de comportement peuvent être identifiés dans l'activité de conduite.

Rasmussen (1986) a proposé un modèle dans lequel trois niveaux de comportement sont différenciés :

- Les comportements basés sur des connaissances permettent l'exécution de tâches nouvelles ou plus complexes impliquant un contrôle conscient (par exemple, garer la voiture pour un conducteur débutant ou réaliser un dépassement).
- Les comportements basés sur des règles permettent l'exécution des tâches familières qui impliquent l'activation de règles précédemment apprises et pour lesquelles un certain niveau de conscience est nécessaire (par exemple, garer la voiture).
- Les comportements basés sur des compétences permettent l'exécution des tâches routinières ou bien entraînées et n'impliquent pas un contrôle conscient (par exemple, changer de vitesse).

Selon Michon (1985), la prise de décision peut être réalisée sur trois niveaux différents :

- Le niveau stratégique constitue le niveau le plus haut du modèle. Ce niveau comprend les décisions concernant la planification du voyage en général, comme le choix de l'itinéraire ou l'heure d'arrivée.
- Le niveau tactique concerne les différentes manœuvres à réaliser pendant la conduite, telles que réaliser un dépassement ou ajuster la vitesse.
- Le niveau opérationnel comprend les activités de contrôle latéral (maintenir la trajectoire de la voiture sur la voie) et longitudinal (contrôler les variations de vitesse).

Ces trois niveaux sont caractérisés également en fonction de la pression temporelle impliquée dans chaque type de décision. Les temps de décisions au niveau tactique sont de l'ordre de quelques secondes, au niveau opérationnel ils sont de l'ordre de quelques millisecondes. En revanche, la pression temporelle est relativement faible dans les décisions stratégiques.

Plus récemment, Brouwer a appliqué le modèle hiérarchique de Michon au problème des déficits entraînant des difficultés à la conduite, chez des populations présentant des problèmes visuels ou cognitifs. Ces déficits se traduisent par des difficultés au niveau opérationnel à cause de ses contraintes temporelles fortes. Mais il souligne que la pression temporelle peut être contrôlée par le conducteur, car certaines décisions au niveau stratégique et tactique peuvent diminuer la pression temporelle au niveau opérationnel (Brouwer, 2002). Ainsi, par exemple, le conducteur peut décider de réduire sa vitesse en passant près d'une école pour diminuer la pression temporelle dans le cas où un enfant traverserait la route de façon inattendue (Brouwer, 2002). C'est particulièrement au niveau tactique que le conducteur peut ajuster ses « marges de sécurité ».

Les modèles motivationnels mettent en avant une notion déterminante dans la tâche de conduite : la perception et la gestion du risque.

L'une des premières théories influentes a été proposée par Wilde dans sa théorie de l'homéostasie du risque (1982). Selon lui, chaque conducteur a son propre niveau de risque « optimal » déterminé en fonction des bénéfices et des coûts que le conducteur attend d'une situation. Lorsqu'il y a un déséquilibre entre le risque réel et le risque subjectif du conducteur, celui-ci essaiera de compenser la différence.

Summala, dans son modèle du risque-zéro (1988) propose aussi que le conducteur a un seuil de risque. Ce niveau de risque est déterminé par des facteurs motivationnels qui généralement impliquent des comportements à risque (par exemple, la hâte ou l'irritation) et d'autres qui les inhibent (par exemple, le sentiment de menace ou la peur). Selon cette théorie, le conducteur essaiera de maintenir le niveau de risque proche de zéro en gardant des « marges de sécurité » appropriées à chaque situation.

Plus récemment, Fuller (2005) a proposé que ce n'est pas le niveau de risque que les conducteurs essaient de compenser, mais plutôt le niveau de difficulté de la tâche de conduite. Le niveau de difficulté est donné par la différence entre les demandes de la tâche de conduite (e.g., vitesse, autres usagers, etc.) et la propre capacité du conducteur (éducation, niveau d'expérience, etc.). Ainsi, le conducteur interviendrait sur ces deux niveaux pour maintenir une conduite sécuritaire. Par exemple, selon ce modèle, le choix de la vitesse est l'une des stratégies que le conducteur peut adopter pour contrôler le niveau de difficulté expérimentée.

2.2.4. Quelles sont les conséquences de la distraction au volant ?

Comme il a été évoqué précédemment dans les modèles cognitifs du traitement de l'information, le niveau d'interférence entre deux tâches peut dépendre du niveau des ressources attentionnelles nécessaires pour chacune des tâches et des modules de traitement impliqués. Ces modèles peuvent

être appliqués dans le cadre de la conduite automobile. Spécifiquement, dans ce contexte, plusieurs tâches sont réalisées en simultanée, liées ou non à la propre activité de conduite.

Ces activités concurrentes peuvent être classées en différents types de distraction en fonction du type de ressources impliquées : visuelles, auditives, physiques et/ou cognitives (Pettitt, Burnett, & Stevens, 2005). Ces types de distractions se produisent, respectivement, lorsque le conducteur concentre son attention sur des cibles visuelles, des signaux auditifs, des objets manipulés physiquement et des pensées, au détriment de la tâche principale de conduite (Young & Regan, 2007).

Nous allons décrire certaines études montrant les effets de la distraction au niveau comportemental et au niveau du traitement de l'information, mais aussi que certaines stratégies que les conducteurs peuvent adopter peuvent réduire l'impact négatif de la distraction.

2.2.4.1. Effets de la distraction au niveau comportemental

Comme il a été précédemment mentionné, la quantité de ressources attentionnelles disponibles est considérablement réduite par la présence d'une tâche compétitive. De plus, si deux tâches partagent le même type de ressources (par exemple, deux tâches de type visuel), le niveau d'interférence sera plus élevé (Wickens, 1984). C'est pourquoi les tâches secondaires visuo-spatio-motrices semblent produire le plus haut niveau d'interférence avec la tâche de conduite qui exige également le même type de ressources (Horberry, Anderson, Regan, Triggs, & Brown, 2006; Hurts, Angell, & Perez, 2011; Schömig & Metz, 2013). Les tâches visuelles les plus fréquemment utilisées pour analyser l'interférence avec la tâche de conduite impliquent la manipulation d'appareils électroniques (et donc des ressources spatiales et motrices sont également impliquées). Les effets de ces tâches ont été généralement associés à une augmentation des déviations latérales de la voie (Drews, Yazdani, Godfrey, Cooper, & Strayer, 2009; Engström, Johansson, & Östlund, 2005; Jamson & Merat, 2005), du nombre de regards hors de la route (Hurts et al., 2011; Kaber, Liang, Zhang, Rogers, & Gangakhedkar, 2012), d'une augmentation des temps de réaction au freinage du véhicule précédent (Drews et al., 2009; Lambale, Kauranen, Laakso, & Summala, 1999) ainsi que d'une réduction de la distance inter-véhiculaire (Jamson & Merat, 2005; Lambale et al., 1999) et de la vitesse (Engström et al., 2005; Horberry et al., 2006; Jamson & Merat, 2005).

Les effets de certaines tâches à caractère intermodal (par exemple, tâches auditives ou cognitives) par rapport à la conduite peuvent dépendre du niveau d'engagement du conducteur à la tâche secondaire. En général, dans des études réalisées en simulateur ou sur piste, l'écoute passive ou active des émissions de radio n'interfère pas avec la tâche de conduite (Collet, Clarion, Morel, Chapon, & Petit, 2009; Ho et al., 2007; Strayer, Drews, Albert, & Johnston, 2001). Cependant, à

mesure que les tâches auditives exigent un plus haut niveau d'engagement et des ressources cognitives (opérations de calcul mental ou conversations plus complexes) se produit une plus forte détérioration de la performance de conduite. La distraction cognitive a montré moins d'effets au niveau du contrôle latéral du véhicule, des variations de la vitesse (Engström et al., 2005; Horberry et al., 2006; Jamson & Merat, 2005) et des déviations du regard hors de la route (Engström et al., 2005; Harbluk, Noy, Trbovich, & Eizenman, 2007; Kaber et al., 2012). Cependant, les tâches cognitives interfèrent avec le temps de détection des stimuli (Collet et al., 2009; Jamson, Westerman, Hockey, & Carsten, 2004; Lambie et al., 1999) et le maintien de distances inter-véhiculaires sécuritaires (Jamson & Merat, 2005; Lambie et al., 1999).

Les tâches visuelles comme les tâches cognitives montrent une détérioration des performances (Engström et al., 2005; Kaber et al., 2012; Lambie et al., 1999), mais cette détérioration intervient à différents niveaux. Kaber et al., (2012) ont suggéré que les tâches visuelles (« détourner les yeux de la route ») interfèrent à un niveau opérationnel selon le modèle de Michon (1985), ce qui implique les activités du contrôle latéral et longitudinal du véhicule. Les tâches cognitives (« détourner l'esprit de la route ») quant à elles affectent le niveau tactique du modèle de Michon au cours duquel le conducteur doit faire les manœuvres nécessaires en réponse à des conditions de circulation, comme les intersections, dépassements, etc.

2.2.4.2. Effets de la distraction au niveau du traitement de l'information

L'effet des tâches secondaires dans la conduite n'a pas seulement été étudié à partir des résultats de la performance des conducteurs. Des mesures physiologiques ont également permis d'étudier le niveau de charge mentale imposé par les doubles tâches. Des exemples de telles mesures comprennent l'analyse des mouvements oculaires (Engström et al., 2005; Kaber et al., 2012; Merat, Jamson, Lai, & Carsten, 2012; Recarte & Nunes, 2000; Schömig & Metz, 2013), l'activité électrodermale (Collet et al., 2009; Engström et al., 2005), la fréquence cardiaque (Engström et al., 2005; Gabaude, Baraca, Jallais, Bonniaud, & Fort, 2012), l'analyse de l'activité électrique du cerveau à partir des mesures électroencéphalographiques (Bruyas et al., 2006; Raabe, Rutschmann, Schrauf, & Greenl, 2005; Rakauskas et al., 2005; Strayer & Drews, 2007) ou magnétoencéphalographiques (Bowyer et al., 2009; Fort et al., 2010) ou encore l'étude des régions cérébrales impliquées dans l'activité de conduite par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Schweizer et al., 2013; Uchiyama et al., 2012)

Étant donné le rôle central que la mesure de potentiels évoqués (PE), au travers de l'électroencéphalographie, occupe dans ce travail de thèse, l'objectif de cette sous-partie sera de discuter certaines études sur simulateur de conduite ayant utilisé cette technique.

L'analyse des PE a été utilisée dans le contexte de la conduite pour examiner principalement les effets liés à la fatigue et la vigilance. Cependant, bien que moins nombreuses, certaines études ont récemment analysé dans des simulateurs de conduite, les effets délétères de la réalisation de tâches secondaires sur le traitement de l'information. Par exemple, le traitement de l'information lors de la détection des stimuli non fréquents (paradigme *oddball*) a été analysé lors de situations de conduite peu ou hautement coûteuse (conduire sans ou avec une pression temporelle) (Raabe et al., 2005) ou en augmentant la charge cognitive au moyen d'une tâche distractive (conversation téléphonique) (Rakauskas et al., 2005). De même, la détection des événements pertinents pour la conduite (comme l'allumage des feux arrière d'un véhicule) a été étudiée dans des situations de conduite où les conducteurs étaient engagés dans une conversation téléphonique (Bruyas et al., 2006; Strayer & Drews, 2007). Ces études ont principalement analysé la composante P3 liée au traitement de plus haut niveau cognitif et reflétant l'attention allouée au traitement de la cible. Leurs résultats ont montré un impact négatif de l'augmentation de la charge mentale, due à la tâche distractive, se traduisant par une diminution de l'amplitude de la composante P3. Ce résultat suggère que la difficulté de la tâche de conduite, ou la présence d'une tâche distractive, entraîne une diminution de l'attention allouée aux cibles et détériore leur traitement.

Malgré les effets négatifs des tâches secondaires observés au niveau du comportement et du traitement de l'information, les conducteurs peuvent adopter certaines stratégies pour réduire ou essayer de compenser cette interférence. Les théories d'adaptation au risque énoncées précédemment ont déjà décrits quelques comportements compensatoires, comme la réduction de la vitesse ou l'adoption de marges de sécurité plus larges.

3. MÉTHODOLOGIE

La partie méthodologique de cette thèse est composée de deux techniques différentes qui nous ont permis de mieux comprendre les effets du système anticollision sur le traitement de l'information et sur le comportement. L'une des particularités de cette thèse a été de recueillir des mesures électroencéphalographiques qui n'ont jamais été utilisées auparavant dans l'étude des systèmes d'alerte anticollision, dans des études sur simulateur de conduite.

Tout d'abord, nous allons présenter les principes généraux de l'électroencéphalographie (EEG), les composantes des potentiels évoqués (PE) qui ont été analysées, les principaux avantages et limitations de cette technique, ainsi que les choix expérimentaux liés à ces mesures dans les deux premières expériences de cette thèse. En second lieu, nous allons décrire les deux types de simulateurs qui ont été utilisés dans ces expériences en mentionnant leurs principaux avantages et limitations : le simulateur simplifié présent dans les deux premières expériences et le simulateur plus réaliste utilisé dans la dernière expérience.

3.1. Électroencéphalographie et Potentiels Évoqués

Dans cette partie nous présenterons la technique générale employée pour recueillir un EEG à partir d'un ensemble d'électrodes réparties sur le scalp, puis nous présenterons plus en détails les potentiels évoqués, leur estimation et les composantes des potentiels évoqués qui ont été étudiées dans ce travail de thèse.

3.1.1. Présentation générale de la méthode

3.1.1.1. Définition

Le flux de courant existant entre les neurones génère un potentiel électrique qui peut être mesuré de façon non invasive au moyen d'électrodes placées sur la surface du scalp (Kutas & Dale, 1997). L'électroencéphalogramme (EEG) reflète les variations de l'activité électrique spontanée du cerveau liées à différents types d'activité neurale. Cette activité spontanée peut-être contaminée par différentes sources de bruits comme les interférences dues au réseau de distribution électrique (50 ou 60 Hz) ou des signaux biologiques tels que les activités musculaire et cardiaque (Key, Dove, & Maguire, 2005). Cet amalgame d'activités peut rendre difficile l'extraction des réponses neurocognitives isolées. L'activité neurale spécifique associée ou évoquée par un événement sensoriel, cognitif ou moteur particulier peut, toutefois, être extraite de cette activité globale par une technique de moyennage permettant d'obtenir un potentiel évoqué (PE) (Luck, 2005).

3.1.1.2. Montage des électrodes

La procédure pour l'obtention d'un EEG et l'estimation des PE associés commence par l'emplacement des électrodes. L'une des pratiques les plus utilisées est basée sur le « Système International 10-20 » (Jasper, 1958) qui permet d'assurer la reproductibilité entre les études. Selon ce système, la distance entre deux électrodes adjacentes correspond à 10% ou 20% de la longueur des lignes antéropostérieures (du nasion au inion) ou latérales (entre les deux points pré-auriculaires en passant par le vertex) (voir Figure 4). Les électrodes sont identifiées par des lettres qui font référence à la région où elles sont placées (F : Frontale, C : Centrale, P : Pariétale, O : Occipitale et T : Temporale) suivies par la lettre « z » si les électrodes sont situées sur la ligne médiane, par des numéros pairs si elles sont dans l'hémisphère droit ou impairs si elles sont placées dans l'hémisphère gauche.

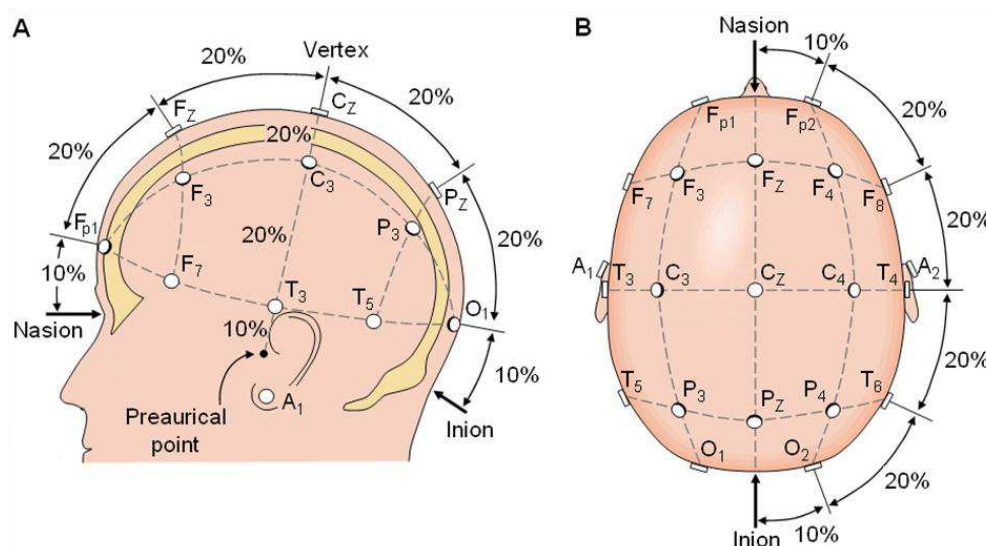


Figure 4. Représentation du montage des électrodes selon le Système International 10-20 sur l'hémisphère gauche (A) et vue de dessus (B). D'après Jasper (1958).

L'EEG nécessite une électrode de référence. En effet, l'EEG reflète la différence de voltage entre l'électrode active et l'électrode de référence et non le voltage d'une seule électrode. L'emplacement de l'électrode de référence doit correspondre à une zone peu affectée par les changements de l'activité électrique. Même si il n'y a pas de zones totalement neutres, certains sites comme le bout du nez, les lobes des oreilles ou les mastoïdes sont souvent utilisées pour placer l'électrode de référence.

3.1.1.3. Traitement du signal

L'activité électrique recueillie par l'EEG est un signal très faible qui nécessite d'être amplifié pour pouvoir être mesuré. De plus, comme il a été signalé précédemment, le signal EEG peut être contaminé par des artéfacts électromagnétiques provenant du réseau électrique ou du corps lui-même (mouvements oculaires, mouvements moteurs, conductance de la peau, etc.). Pour atténuer cette activité, des filtres qui ne laissent pas passer les fréquences supérieures ou inférieures à un certain seuil peuvent être utilisés pendant l'enregistrement du signal EEG (filtre analogique) et ou a posteriori (filtre digital).

Étant donnée la faible amplitude des PE (de l'ordre de la dizaine de microvolts) en comparaison avec l'activité électrique spontanée recueillie dans l'EEG (de l'ordre de la centaine de microvolts), il est difficile de distinguer le signal associé à un stimulus particulier. Pour cela, il faut répéter un grand

nombre de fois le stimulus d'intérêt et moyenner tous les segments d'EEG calés sur le début de ce stimulus (voir Figure 5). En effet, l'activité spécifique évoquée par un stimulus est relativement stable d'un essai à l'autre tandis que le bruit est aléatoire. Ainsi, grâce au moyennage, le bruit aléatoire tend à s'atténuer et l'activité spécifiquement associée au stimulus ou potentiel évoqué est alors révélée.

Une fois que le PE a été extrait il est possible d'identifier une succession d'ondes ou composantes caractérisées par leur polarité, latence, amplitude et topographie (voir Figure 5, en bas).

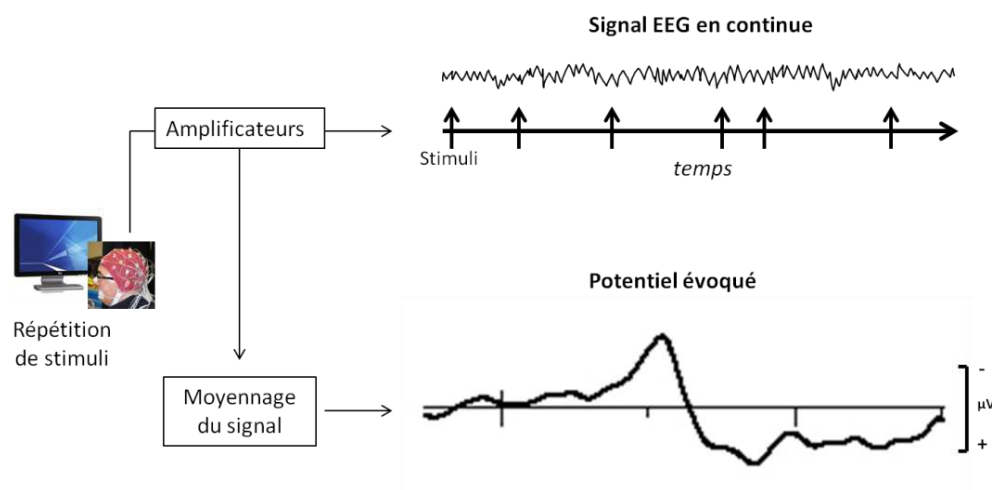


Figure 5. Représentation de la méthode d'extraction des potentiels évoqués. En haut : signal EEG enregistré en continu à partir d'une électrode pendant la présentation de stimuli. En bas : PE obtenu par moyennage de séquences du signal EEG calées sur les stimulations.

Ces composantes sont habituellement désignées par une lettre (N ou P) correspondant à la polarité de la composante (négative ou positive) et par un numéro correspondant à sa position dans la chronologie (par exemple, P1, N1, N2, etc.) ou à la latence de son apparition ou de son pic (par exemple, N185 visuelle correspond à une composante négative dont le pic est atteint autour de 185 ms après la présentation du stimulus). Les différences observées en fonction des conditions expérimentales dans la latence du pic d'une composante pourraient être liées à la vitesse du traitement de l'information du stimulus. L'amplitude du pic d'une composante mesurée en microvolts est généralement interprétée en termes d'activation ou de ressources engagées dans le traitement du stimulus. Finalement, la topographie fait référence à la distribution d'une composante sur le scalp et permet d'identifier les électrodes où l'amplitude est plus grande.

Les différentes composantes des PE dépendent à la fois du type de stimulus employé (composantes sensorielles) et du type de tâche à effectuer (composantes cognitives). Par ailleurs, leurs caractéristiques en termes de latence et d'amplitude reflètent différents processus cognitifs (attention, motivation, etc.).

3.1.1.4. Avantages et limites

L'un des principaux avantages des potentiels évoqués est l'identification des différentes étapes dans le traitement de l'information (par exemple, processus d'anticipation, sensoriels et cognitifs) et leur modification suite à des manipulations expérimentales. De plus, les PE peuvent être enregistrés indépendamment du fait que le sujet ait à donner une réponse motrice ou non. Enfin ils présentent une haute résolution temporelle (de l'ordre de la milliseconde).

En ce qui concerne leurs limitations, comme il a été mentionné précédemment, les PE sont très sensibles aux artefacts en provenance de l'environnement et du propre corps du sujet. De plus, la faible intensité des PE nécessite de répéter un grand nombre de fois la stimulation d'intérêt (des dizaines ou des milliers de fois selon la stimulation et les composantes des PE observées). Dans des conditions de recherche appliquées comme la conduite automobile ceci peut rendre la tâche monotone, longue et moins réaliste.

3.1.2. Composantes des PE analysées

3.1.2.1. La Variation Contingente Négative (VCN)

La VCN est une onde négative lente apparaissant généralement lorsque deux stimuli ont été présentés de façon associée, séparés par un intervalle de temps de l'ordre d'une seconde (Walter, Cooper, Aldridge, McCallum, & Winter, 1964) (Figure 6).

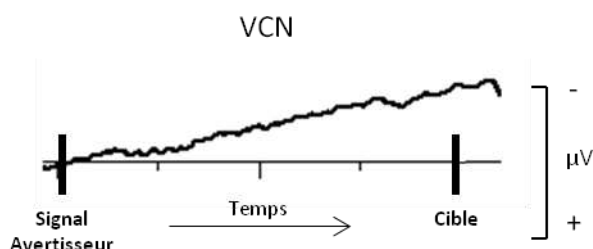


Figure 6. Représentation typique de la composante de la variation contingente négative.

Ainsi, lorsque le premier stimulus ou signal avertisseur précède le deuxième stimulus ou cible, nous pouvons observer cette augmentation lente de la négativité qui peut être interprétée comme une attente liée à un processus de préparation de réponse à la cible. En général, lorsque l'intervalle de temps entre le signal et la cible est plus grand (plus d'une seconde), nous pouvons distinguer une onde plus précoce identifiée juste après le signal avertisseur et une autre plus tardive identifiée avant l'apparition de la cible (Loveless, 1973). La première a une activation maximale sur le cortex frontal et a été associée au processus d'orientation alors que la deuxième apparaît sur le cortex préfrontal et a été liée au processus d'attente. L'amplitude de la VCN peut être modulée selon différents facteurs tels que la pression temporelle, l'effort mental (voir Wild-Wall, Hahn, & Falkenstein, 2011) ou l'orientation temporelle (Correa et al., 2006).

3.1.2.2. La N1 visuelle

Cette composante atteint son amplitude maximale autour de 150-200 ms après la présentation de la cible au niveau des régions pariétales et occipitales (voir Figure 7).

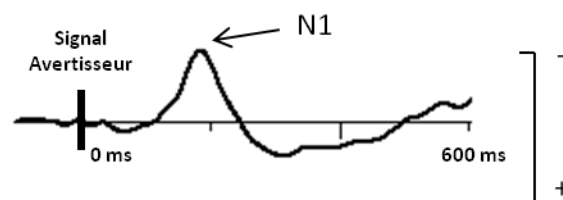


Figure 7. Représentation typique de la composante N1.

Il s'agit d'une composante sensorielle dont les caractéristiques dépendent en grande partie des caractéristiques physiques de la stimulation. Elle reflèterait également des processus liés à la discrimination visuelle (Vogel & Luck, 2000). Il a été observé que l'attention spatiale sélective module cette composante. Ainsi, des amplitudes plus grandes sont trouvées lorsque les stimuli apparaissent dans une zone du champ visuel attendue par rapport à une zone non attendue (Clark & Hillyard, 1996).

3.1.2.3. La N2

Le pic de la N2 est généralement atteint entre 180 et 325 ms suivant la présentation de la stimulation d'intérêt (voir Figure 8).

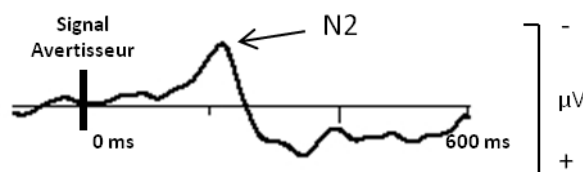


Figure 8. Représentation typique de la composante N2.

Elle peut être mise en évidence dans des paradigmes expérimentaux de type *Oddball* dans lesquels une succession de deux types de stimuli est présentée de façon continue, l'un apparaissant régulièrement (stimulus fréquent) alors que l'autre apparaît de façon peu fréquente (stimulus rare). La N2 est principalement observée suite au stimulus rare (Näätänen & Picton, 1986 cité dans Patel & Azzam, 2005). Elle a été catégorisée en plusieurs sous-composantes. La N2a peut être observée dans des régions frontocentrales et est liée à la détection des stimuli nouveaux ou déviants (stimulus rare) qui ne sont pas pertinents pour la tâche. La N2b, également identifiée dans des régions frontocentrales, n'apparaît que lorsque les sujets portent attention au stimulus rare. Elle pourrait être impliquée dans des processus de contrôle cognitif, comme la surveillance et le contrôle de la stratégie dans une tâche et les processus d'inhibition. La N2c apparaît dans des régions plus postérieures et elle reflèterait l'attention vers des localisations attendues (Folstein & Van Petten, 2008; Kutas & Dale, 1997; Luck, 2005).

Cette composante apparaît souvent en combinaison avec la P3 formant ainsi le « complexe N2-P3 ».

3.1.2.4. La P3

La P3 apparaît à partir de 300 ms et jusqu'à 900ms après la stimulation d'intérêt (voir Figure 9).

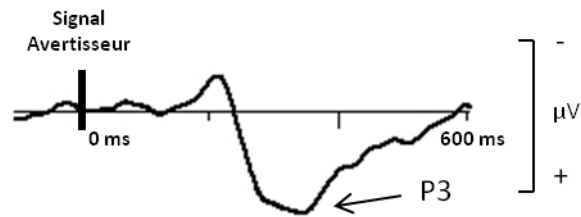


Figure 9. Représentation typique de la composante P3.

Deux sous-composantes principales ont été identifiées, la P3a et la P3b. Comme la N2, elle est souvent mise en évidence dans des paradigmes de type *Oddball*. La première sous-composante, la P3a, est distribuée frontalement et est induite par des stimuli rares ou nouveaux et non pertinents tandis que la P3b apparaît dans des régions pariétales suite à des stimuli également rares mais pertinents pour la tâche (attention dirigée vers ces stimuli). Bien que cette composante ait été l'une des plus étudiées, les processus sous-jacents à l'apparition de cette composante ne sont pas encore bien compris. Cependant, plusieurs processus qui modulent l'amplitude et la latence du pic de la P3 ont été proposés. D'abord, l'amplitude de la P3 est modulée par la fréquence des stimuli : plus la fréquence est faible, plus son amplitude est grande. De plus, son amplitude est modulée par le degré d'attente au stimulus et l'effort investi dans la tâche (Polich, 2007). Ainsi elle peut être utilisée comme un indicateur de l'allocation des ressources attentionnelles. Finalement, toutes les manipulations qui retardent le processus de catégorisation d'un stimulus seront reflétées par une augmentation de la latence de la P3 (Coles & Rugg, 1995; Luck, 2005).

3.1.3. Choix expérimentaux

Nous avons utilisé les mêmes critères méthodologiques pour l'enregistrement et l'analyse des potentiels évoqués dans nos deux études électrophysiologiques.

L'EEG a été enregistré en continu à partir du système d'acquisition *Active Two* de *Biosemi*® (<http://www.biosemi.com/>). Nous avons utilisé un bonnet avec 34 électrodes actives réparties sur le scalp en majorité selon le Système International 10-20 (voir Figure 10). En plus, deux électrodes ont été placées sur les mastoïdes pour identifier la tension musculaire, une autre électrode sur le coin de la bouche pour identifier l'activité musculaire liée aux réponses verbales des participants et une électrode a été placée sur l'angle externe de l'œil droit pour identifier les saccades des yeux. L'électrode de référence a été placée sur le nez.

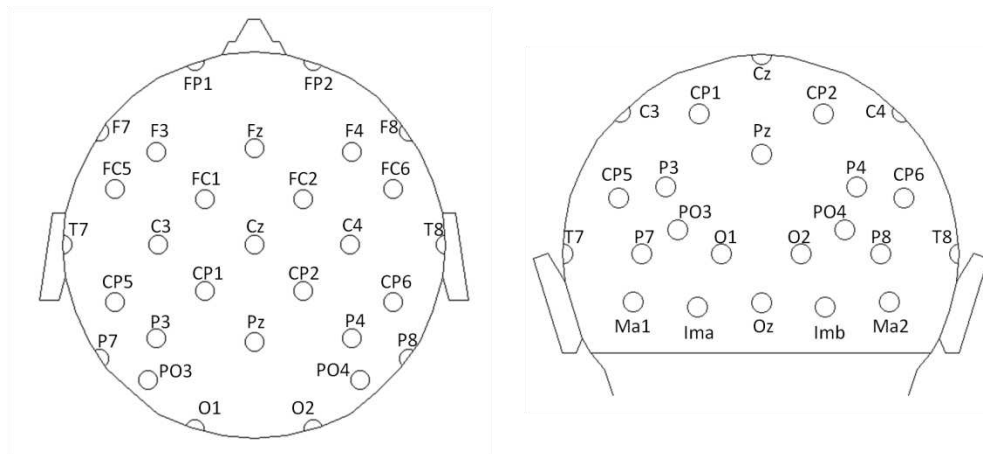


Figure 10. Vue de dessus (gauche) et postérieure (droite) de l'emplacement des 34 électrodes.

Les électrodes utilisées étaient des électrodes pré-amplifiées (électrodes actives, impédance= 300 MΩ à 50 Hz (1012Ω // 11 pF)), permettant de travailler plus facilement dans un environnement bruité. L'échantillonnage du signal était fixé à une fréquence de 1024 Hz et filtré de façon analogique avec un filtre de bande passante 0-100 Hz.

Les PE ont été obtenus par moyennage pour chaque condition expérimentale à partir du logiciel ELAN (Aguera, Jerbi, Caclin, & Bertrand, 2011). L'analyse de la VCN a été effectuée sur une fenêtre temporelle de -1000 ms à 100 ms autour de l'apparition de la cible pour la première expérience et de -800 ms à 100 ms pour la deuxième expérience. Les PE ainsi obtenus ont été numériquement filtrés à 0-30 Hz. La fenêtre temporelle concernant l'analyse des PE se situait entre -100 ms et 600 ms pour la N1, la N2 et la P3². Ces PE ont été numériquement filtrés à 0.2-30 Hz. De plus, les signaux dont l'amplitude sur au moins une électrode dépassait 200 µV ont été rejetés.

3.2. Les simulateurs de conduite

3.2.1. Généralités

Les simulateurs de conduite sont des outils qui se sont révélés efficaces dans l'étude des systèmes d'aides à la conduite et, en particulier, en ce qui concerne les systèmes d'alerte anticollision. Compte tenu du risque pour la sécurité et la difficulté à simuler les collisions par l'arrière dans des situations de

² Pour une question de simplicité, nous nous référons à ces composantes comme N2 et P3 bien que ce soient les sous-composantes N2b et P3b qui ont été mises en évidence dans nos expériences.

la vie réelle, une grande partie des recherches dans ce domaine a été menée à l'aide des simulateurs de conduite. Dans ce contexte de réalité virtuelle, différents scénarios (autoroute, brouillard, densité du trafic, etc.) peuvent facilement être créés et des situations de collisions peuvent être simulées sans aucun risque pour les conducteurs. De plus, le même type de mesures comportementales que celles obtenues dans des conditions réelles de conduite peuvent être recueillies avec les simulateurs de conduite (par exemple, le temps de réaction au freinage, l'angle du volant ou la vitesse). Reste à savoir si les comportements observés dans des conditions de conduite de la vie réelle se trouvent reflétés dans les études sur simulateurs de conduite. Cette question introduit les concepts de validité absolue et relative (Blaauw, 1982). Le premier implique une correspondance presque parfaite entre les mesures obtenues en conduite réelle et simulée (par exemple, même vitesse). Le deuxième implique que les performances observées dans les deux contextes vont dans la même direction même si elles ne sont pas du même ordre de grandeur. Il semble que la validité relative est suffisante pour justifier l'usage des simulateurs (Wang et al., 2010). Plusieurs études ont confirmé cette idée en observant des correspondances entre les comportements observés dans différents types de simulateurs et en conduite réelle (Santos, Merat, Mouta, Brookhuis, & De Waard, 2005; Wang et al., 2010)

Cependant, même si les simulateurs de conduite peuvent être un outil efficace pour étudier le comportement des conducteurs, la sensation de risque dans cet environnement virtuel reste une notion assez distante de la réalité.

De plus, l'un des principaux problèmes associés aux simulateurs est connu comme le « mal du simulateur ». Ce mal du simulateur est causé par une discordance entre le mouvement perçu au niveau visuel et l'absence de mouvement perçu au niveau vestibulaire (Carsten & Jamson, 2011). Cette incohérence provoque une sensation semblable au mal du transport. Même si tous les conducteurs ne sont pas sensibles à cet effet, certains types de simulateurs ainsi que certaines conditions dans lesquelles la perception vestibulaire joue un rôle important (par exemple, les virages ou les décélérations brusques), peuvent être particulièrement critiques.

3.2.2. Le simulateur de conduite simplifié

3.2.2.1. Description

Le simulateur de conduite simplifié utilisé dans nos études était composé d'un fauteuil, d'un écran d'ordinateur placé à environ un mètre du visage du participant, d'un volant et d'un pédalier (voir Figure 11). Afin de diminuer les mouvements des bras, la vitesse n'était contrôlée que par la pédale d'accélérateur (pas de manipulation du levier de vitesse). Les sons propres au véhicule (moteur,

roulement, démarreur) et au système d'alerte anticollision (signal avertisseur) étaient diffusés par des haut-parleurs. L'environnement virtuel était basé sur l'architecture SIM2 qui s'appuie sur le modèle de trafic ARCHISIM développé par le Laboratoire Exploitation, Perception, Simulations et Simulateurs de conduite (LEPSiS) de l'IFSTTAR. Les images de la simulation étaient projetées à une fréquence moyenne de 58,8 Hz et les données de conduite ont été enregistrées à la même fréquence.



Figure 11. Contexte expérimental et matériels utilisés pendant les deux premières expériences.

3.2.2.2. Avantages et limites

Afin de limiter les interférences motrices pour le recueil des potentiels évoqués au cours des deux premières expériences, celles-ci ont été réalisées sur ce simulateur de conduite simplifié. En effet, la simulation projetée sur un seul écran réduit considérablement les mouvements des yeux, ce qui constitue l'un des principaux artefacts pour l'obtention d'un bon signal électroencéphalographique. Par ailleurs, le mal du simulateur est très rare dans ce type de simulateurs.

En revanche, le contexte peu réaliste des simulateurs de conduite simplifiés peut rendre difficile l'immersion des participants dans des situations de conduite simulées. De plus, les scénarios de conduite ont été extrêmement simplifiés (voir ci-dessous) pour limiter les mouvements des yeux. Par conséquent, cet environnement expérimental pourrait favoriser des comportements qui ne sont pas complètement naturels.

De plus, la validité des résultats obtenus dans ce type de simulateur pourrait être également questionnée. En effet, la correspondance trouvée entre les études menées sur ce type de simulateur simplifié et les études sur piste n'est pas retrouvée dans tous les paramètres mesurés (Rudin-Brown & Noy, 2002; Santos et al., 2005). Ainsi les résultats obtenus sur simulateurs simplifiés doivent être interprétés avec prudence. Toutefois, nous nous sommes intéressés ici uniquement à des temps de réaction au freinage et à leurs variations en fonction de différentes conditions expérimentales. Cette mesure semble montrer une bonne validité relative.

3.2.2.3. Scenarios

Les scénarios de conduite ont été définis principalement pour extraire des processus de comportement simple (des temps de réaction) et pour limiter la contamination visuelle et donc les mouvements des yeux (pas de recherche visuelle). Plus précisément, les scénarios étaient composés d'une route nationale limitée en décor (seulement quelques arbres et maisons) et sans trafic dans le sens inverse. De plus, les conditions de visibilité étaient dégradées par un brouillard dense pour justifier les freinages fréquents de la moto (voir Figure 12).



Figure 12. Images issues des scénarios et illustrant à gauche la scène de suivi de la moto à une distance inter-véhiculaire prédéfinie et à droite la décélération de la moto avec le feu arrière allumé (cible).

3.2.3. Le simulateur de conduite plus réaliste

3.2.3.1. Description

Un simulateur de conduite plus réaliste développé par le LEPSiS (IFSTTAR) a été utilisé pour la troisième expérience de cette thèse. Il est composé d'une cabine Peugeot 308 à base fixe instrumentée à l'aide de capteurs (voir Figure 13). La vision vers l'avant est fournie par cinq écrans (220 cm de hauteur par 165 cm de large) qui représentent un champ visuel de 180° dans le plan horizontal et 47° dans le plan vertical. En plus, trois moniteurs à l'arrière (48 cm de haut x 56 cm de large), l'un placé à l'intérieur et deux à l'extérieur du véhicule, permettent de refléter l'image de la scène arrière sur les rétroviseurs. Le son est diffusé dans la cabine et la simulation virtuelle a été contrôlée par SIM2 et ARCHISIM. Le modèle de voiture simulée fonctionnait avec une boîte de vitesse manuelle.

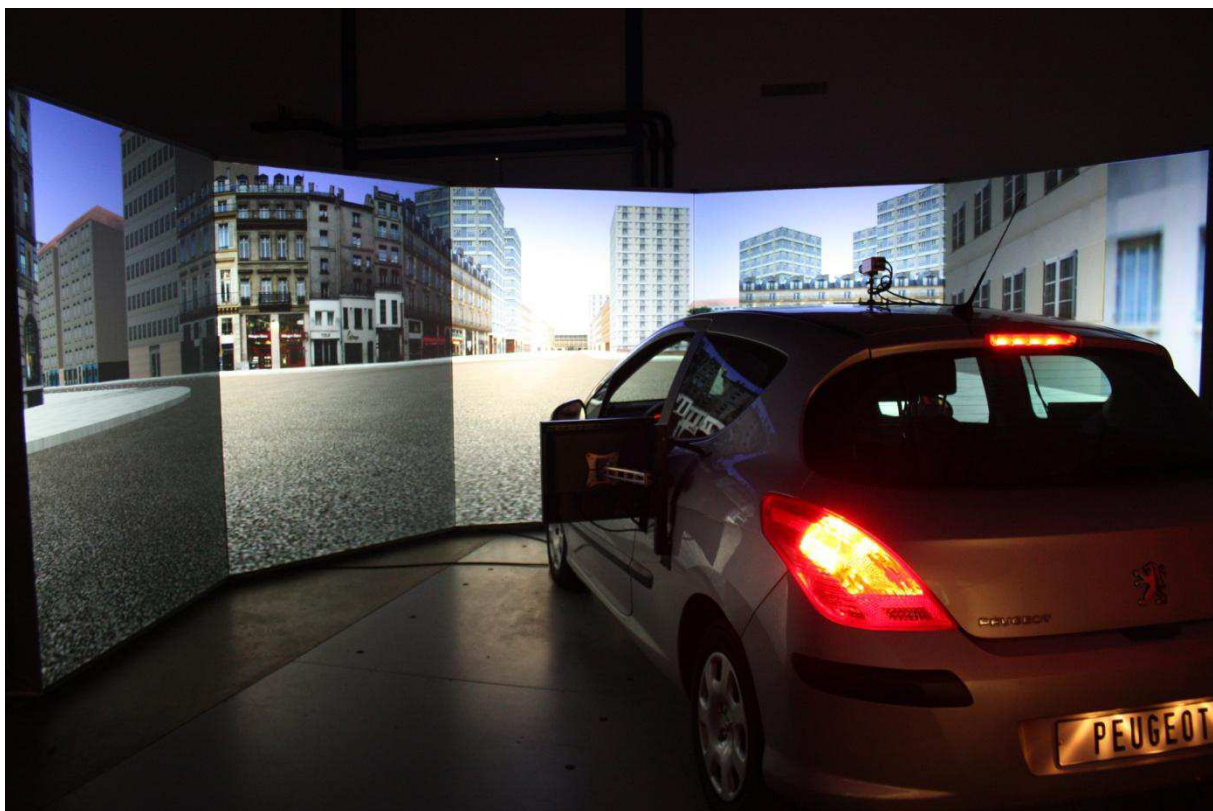


Figure 13. Contexte expérimental de la troisième expérience.

3.2.3.2. Avantages et limites

Le contexte fourni par les simulateurs plus réalistes permet une plus grande immersion des conducteurs dans les expériences et favorise ainsi des comportements plus naturels.

Toutefois, l'un des principaux problèmes associés aux simulateurs plus réalistes est connu comme le « mal du simulateur » présenté précédemment.

Enfin, ce contexte plus réaliste peut rendre plus difficile l'enregistrement des mesures électroencéphalographiques, mesures assez sensibles aux mouvements oculaires et moteurs.

3.2.3.3. Scénarios

Les scénarios de conduite définis dans cette expérience sont assez proches des scénarios des expériences précédentes mais permettent une conduite plus naturelle (boîte de vitesse manuelle, contrôle de la vitesse, etc.). Les scénarios étaient composés d'une route nationale avec plus de décor que dans les expériences antérieures et avec du trafic dans le sens inverse. Cependant, le décor et le nombre d'intersections ont été volontairement restreints afin de limiter le mal du simulateur. Les conditions de visibilité étaient également dégradées par un brouillard dense pour justifier les freinages fréquents du véhicule précédent.

4. PARTIE

EXPÉRIMENTALE

4.1. Expérience 1 : Une étude électrophysiologique de l'impact d'un système d'alerte anticollision dans une tâche de conduite simulée

Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., and Fort, A. (2012). An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. Brain Research, 1470, 69-79.

4.1.1. Objectif et justification

L'objectif de notre première expérience a été d'analyser l'impact sur le comportement et le traitement de l'information d'un système d'alerte anticollision en fonction de sa fiabilité et de l'état attentionnel des conducteurs.

Concernant la fiabilité du système, comme nous l'avons mentionné dans la section 2.1.8.1, aucun des systèmes actuellement sur le marché n'est complètement fiable. De plus, il a été montré que la performance des conducteurs et l'acceptation du système peuvent varier en fonction de ce niveau de fiabilité.

Nous avons également étudié l'état attentionnel du conducteur puisque la distraction du conducteur est la principale cause des collisions par l'arrière. C'est pourquoi il est attendu que les systèmes anticollision aident particulièrement les conducteurs distraits. Cependant, relativement peu d'études ont comparé de manière systématique l'efficacité de ces aides chez le conducteur distrait et non

distract. Même si différents types de distraction peuvent être simulés, nous avons décidé d'analyser l'efficacité du système lors de la réalisation d'une tâche de distraction cognitive.

Dans ce type d'études, sont classiquement observés les effets des manipulations expérimentales au niveau de la performance des conducteurs, comme la vitesse ou la précision d'une réponse. Dans la présente expérience, au-delà de ces mesures comportementales, nous avons enregistré des mesures électroencéphalographiques, mesures encore jamais utilisées dans l'étude d'un système d'alerte anticollision. Ce type de mesures nous a permis d'analyser l'impact de ce type de système sur les différentes étapes du traitement de l'information.

4.1.2. Méthode

4.1.2.1. Population

Douze hommes de 25 à 35 ans (moyenne d'âge : 30.6 ans) ont participé à cette étude. Tous possèdent le permis de conduire depuis au moins trois ans et ont conduit au moins 3000 km par an sur la dernière année (moyenne : 16042 km). Deux tests évaluant le fonctionnement cognitif (le Trail Making Test, Part A et B et le test de codes de Wechsler) nous ont permis de vérifier qu'aucun participant n'avait de déficits cognitifs.

4.1.2.2. Protocole

Cette étude a été menée à l'aide d'un simulateur de conduite simplifié (voir section 3.2.2.). La tâche des participants était de conduire en suivant une moto. Ils devaient maintenir la pédale d'accélérateur enfoncée au maximum, ce qui correspondait à une vitesse moyenne de 90 km/h. La moto décélérait fréquemment et les participants devaient lever le pied de l'accélérateur uniquement lorsque le feu arrière (cible) de la moto s'allumait. Un signal avertisseur de type sonore, déclenché avant l'apparition de la cible, pouvait aider les participants à anticiper l'apparition de la cible. Pour étudier l'impact de la fiabilité du système, trois conditions d'alerte ont été manipulées dans cette étude :

- Sans système : le signal n'était jamais disponible.
- Système imparfait : le signal apparaissait avant l'allumage du feu dans 70% des essais. Dans 15% des essais le signal apparaissait sans être suivi de la cible (fausse alarme) et dans 15% des essais, la cible apparaissait sans être précédée du signal (défaut de détection).
- Système parfait : le signal apparaissait toujours avant l'allumage du feu arrière.

Deux conditions de conduite ont été utilisées : simple et double tâche. Dans la condition de double tâche, en plus de la tâche de conduite, les participants ont réalisé une tâche secondaire à caractère cognitif. Dans cette tâche nommée « le mot mystère », le participant écoutait trois mots sans rapport direct entre eux et devait trouver un quatrième mot lié à chacun des mots présentés, soit par le biais d'une expression soit par un lien sémantique. Par exemple, nous avons utilisé la série de trois mots suivante « Crayon – Rien – Charbon » avec comme réponse possible « Mine » (« mine de crayon », « mine de rien » et « mine de charbon »).

La performance des conducteurs a été mesurée en prenant en compte les temps de réaction à la cible. L'analyse par les potentiels évoqués de l'activité cérébrale liée au traitement de l'information a été centrée sur les processus d'anticipation (VCN), sensoriels (N1) et cognitifs (N2 et P3).

4.1.3. Discussion des principaux résultats

Concernant l'efficacité du système au niveau comportemental, les résultats ont montré un bénéfice du système tant dans la condition « système parfait » que dans la condition « système imparfait », mais uniquement lorsque les participants n'étaient pas distraits. La tâche de distraction cognitive a augmenté considérablement les temps de réaction à la cible et le système n'a pas été assez efficace pour compenser cet effet négatif.

Ces résultats ont été partiellement confirmés sur le plan neural. En effet, si nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet du système imparfait, le système parfait a montré des effets positifs sur le traitement de la cible en simple tâche. Précisément, le signal avertisseur semble avoir facilité le traitement cognitif de la cible par une réduction de l'amplitude et de la latence de la N2. Ces résultats pourraient refléter une facilitation de l'attente temporelle pour les cibles à venir.

Un effet négatif global de la distraction a été mis en évidence à toutes les étapes du traitement de l'information étudiées (anticipation, traitement sensoriel et cognitif). Même si les différences à ces trois niveaux de traitement entre les conditions de simple et double tâche ont été moins marquées avec la présence du système, cela n'a pas été suffisant pour éliminer l'effet négatif de la double tâche.

En conclusion et contrairement à nos attentes, lorsque les participants étaient distraits par une tâche cognitive, nous n'avons pas trouvé d'effet positif du système, et ce, aussi bien au niveau comportemental qu'au niveau neural. Ce pattern de résultats peut être expliqué par deux hypothèses alternatives.

Selon notre première hypothèse, dans la condition de double tâche, les deux tâches seraient en compétition pour les ressources attentionnelles disponibles. Le signal avertisseur pourrait ne pas être traité de façon automatique et donc ne bénéficierait pas du niveau requis de ressources attentionnelles. En effet, la tâche de conduite était relativement facile. Par conséquent, les participants non distraits auraient eu assez de ressources pour traiter le signal et bénéficier de son assistance. En revanche, la tâche secondaire utilisée dans cette étude était une tâche à haute demande cognitive. Il est alors possible que les ressources attentionnelles restantes aient été insuffisantes pour traiter le signal avertisseur (voir Figure 14). Cette interprétation est en accord avec les études en psychologie cognitive portant sur l'effet négatif de la double tâche quand la tâche secondaire nécessite beaucoup de ressources attentionnelles.

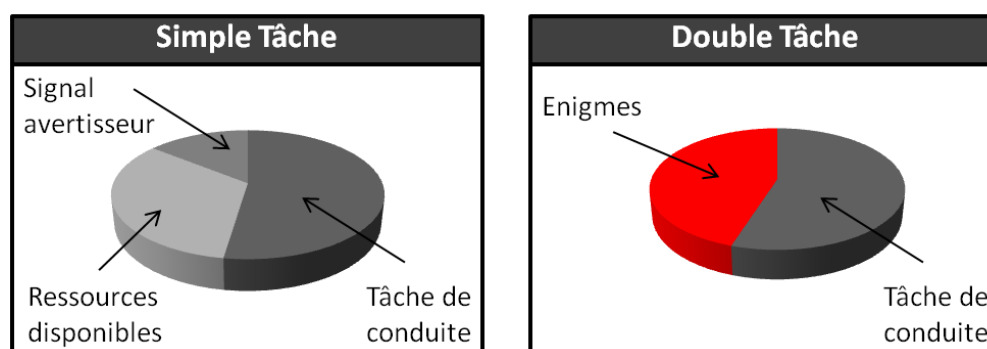


Figure 14. Schéma illustrant les ressources attentionnelles disponibles pour traiter le signal avertisseur en simple et en double tâches.

La deuxième hypothèse pouvant expliquer l'inefficacité du système en condition de distraction concerne le protocole expérimental. En effet, comme le montre la Figure 15, tous les essais dans toutes les conditions expérimentales commençaient par une décélération de la moto avant l'apparition du signal avertisseur et l'allumage du feu. Ainsi, il est possible que les participants aient utilisé cette information visuelle comme un meilleur prédicteur de la présence de la cible que le signal avertisseur, celui-ci n'étant pas toujours présent.

Type de Système	Type d'essai	Séquence
Sans Système	Sans Système	Décélération ————— Feu Stop ————— —————→
Système Imparfait	Détection Correcte	Décélération Signal Avertisseur Feu Stop ————— ————— —————→
	Fausse Alarme	Décélération Signal Avertisseur ————— —————→
	Défaut de Détection	Décélération ————— Feu Stop ————— —————→
Système Parfait	Détection Correcte	Décélération Signal Avertisseur Feu Stop ————— ————— —————→

Figure 15. Séquence expérimentale pour chaque essai dans les trois conditions de système.

L'étude suivante a été réalisée pour tester l'efficacité du FCWS en éliminant cet artefact expérimental en simple et double tâches afin de tester cette interprétation alternative de nos résultats.

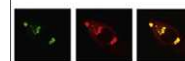
4.2. Article 1

Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

www.elsevier.com/locate/brainres

Brain Research



Research Report

An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task

Mercedes Bueno^{a,b,c,*}, Colette Fabrigoule^c, Philippe Deleurence^{a,b},
Daniel Ndiaye^d, Alexandra Fort^{a,b}

^aIFSTTAR, LESCOT, F-69675 Bron, France^bUniversity of Lyon, F-69622 Lyon, France^cUniversity of Bordeaux Segalen, USR CNRS 3413 SANPSY, F-33076 Bordeaux, France^dUniversity of Paris-Est, IFSTTAR, IM, LEPSIS, F-75732 Paris, France

ARTICLE INFO

Article history:

Accepted 20 June 2012

Available online 2 July 2012

Keywords:

Forward Collision Warning System

Event Related Potential

Information processing

Driver distraction

Reliability

ABSTRACT

Driver distraction has been identified as the most important contributing factor in rear-end collisions. In this context, Forward Collision Warning Systems (FCWS) have been developed specifically to warn drivers of potential rear-end collisions. The main objective of this work is to evaluate the impact of a surrogate FCWS and of its reliability according to the driver's attentional state by recording both behavioral and electrophysiological data. Participants drove following a lead motorcycle in a simplified simulator with or without a warning system which gave forewarning of the preceding vehicle braking. Participants had to perform this driving task either alone (simple task) or simultaneously with a secondary cognitive task (dual task). Behavioral and electrophysiological data contributed to revealing a positive effect of the warning system. Participants were faster in detecting the brake light when the system was perfect or imperfect, and the time and attentional resources allocation required for processing the target at higher cognitive level were reduced when the system was completely reliable. When both tasks were performed simultaneously, warning effectiveness was considerably affected at both performance and neural levels; however, the analysis of the brain activity revealed fewer differences between distracted and undistracted drivers when using the warning system. These results show that electrophysiological data could be a valuable tool to complement behavioral data and to have a better understanding of how these systems impact the driver.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

According to the National Highway Traffic Safety Administration (2009), rear-end collisions represent approximately 30% of all crashes. Although the proportion of fatalities as a result of these collisions is relatively low (5.4%), these crashes

are one of the most frequent types of collisions, disturbing traffic flow and representing an important economic cost for society.

There are three factors that contribute to rear-end collisions. According to the sources, the environment (e.g. poor visibility, slick roads) has been identified as a crash

*Corresponding author at: IFSTTAR-LESCOT, 25 Avenue François Mitterrand, 69675 Bron Cedex, France. Fax: +33 472 376 837.

E-mail address: mercedes.bueno-garcia@ifsttar.fr (M. Bueno).

contributing factor in 5–11% and the vehicle (e.g. brake system) in 12–20% of the cases. However, the factor that most frequently contributes to rear-end collisions (from 75% to 93%) is the driver (Knippling et al., 1993; Kuge et al., 1995; Vogel and Bester, 2005). Specifically, driver distraction is the main reason (60%) for these accidents. In this context, Forward Collision Warning Systems (FCWS) have been developed to warn drivers of potential rear-end collisions. This kind of system provides a warning signal (e.g. visual, auditory, and/or tactile) when there is a risk of collision. In general, the moment for triggering a warning is calculated as a function of either the time to collision between two vehicles traveling at their current speed, or the minimum distance required to stop the vehicle safely (Bella and Russo, 2011). The benefits of these systems for drivers are clear and it has been demonstrated that a warning system is more effective than no warning at all. For example, the impact of the systems on safety can be visible by reducing the number of collisions (Lee et al., 2002; Zhu, 2001), by returning attention to the critical direction if necessary (Ho and Spence, 2009), by faster braking reaction times in detecting critical situations (Abe and Richardson, 2006), and/or, by longer and safer headways (Ben-Yaacov et al., 2002).

Given its implication in road safety, driver distraction has been the central issue in numerous scientific reports (e.g. Regan et al., 2008). Regan et al. (2011, p. 1780) define driver inattention as “insufficient or no attention to activities critical for safe driving” whereas driver distraction or driver-diverted attention is a type of driver inattention where the attention to activities critical for safe driving is threatened by the diversion towards another competing activity. Most of the studies showed a clear benefit from the FCWS when drivers are undistracted. For instance, Maltz and Shinar (2004) found that participants driving in a simulator equipped with an FCWS adopted longer headways than non-equipped drivers. Ho et al. (2006) also reported safer headways together with faster reaction times in detecting potential rear-end collisions when the warning system was available. Nevertheless, even if it is known that the majority of these collisions are due to distraction, relatively few studies have focused on the impact of the FCWS on both undistracted and distracted drivers. The existing data showed that distracted drivers are those who most benefited from the warning systems and, in some cases, the system even completely dissipated the negative effect of being distracted (Ho and Spence, 2009; Lee et al., 2002). However, the results could vary depending on the warning modality and the kind of secondary task carried out (different modalities or mental workload). For example, Mohebbi et al. (2009) studied the effectiveness of an auditory and tactile warning in avoiding collisions with the lead vehicle when participants were distracted by having a simple conversation (demographic and personal questions) or a complex conversation (mental calculation and categorization questions). Their results showed that when participants were engaged in a complex conversation, only the tactile warning was effective, whereas when engaged in a simple conversation, both warnings were useful. However, in this case, only the tactile one completely eliminated the disruptive effect of the secondary task.

The FCWS is designed to provide assistance and to avoid accidents or at least mitigate their consequences. However,

these systems are not completely reliable and cannot replace the driver. It is known that the warning may malfunction, producing false alarms and/or misses of critical events. False alarms refer to the situations in which an alert is issued in the absence of any potential collision. Misses occur when an alert is not triggered despite the situation requiring it. Differences in acceptance of the system and, consequently on driver performance, could be noticed depending on the missed or false alarm rate given by the system (Sullivan et al., 2007). Drivers could consider the system as ineffective if the number of false alarms is too high. Usually, false alarms are irritating and distracting when unnecessary (Maltz and Shinar, 2004). Thereby, if false alarms are frequent, users might ignore the system or might react inadequately to valid warnings (Lerner et al., 1996). Similarly, drivers could consider the system as ineffective if the threshold for triggering the warning is too strict. Nevertheless, misses could be seen in this context as more “practical” and helpful than false alarms. Indeed, if a system almost never fails to detect a collision, drivers may over-rely on it and become vulnerable or not react adequately, when, for example, driving an unequipped vehicle (Parasuraman et al., 1997). But assessing which level of false alarms/misses is acceptable is complicated, given that the probability of experiencing a rear-end collision during a lifetime is very low, and the efforts for finding out the cut-off point have not been very conclusive as yet (Kiefer et al., 1999; Lerner et al., 1996).

Other studies have investigated the reliability of the system focusing on the percentage of true alarms without specifying the amount of false alarms or misses. In general, higher levels of reliability result in better performance, but the point where the system becomes useless remains unclear. Bliss and Acton (2003) noted that participants responded more frequently to the warning and maneuvered more appropriately in avoiding collisions when the warning was 100% reliable. Nevertheless, Maltz and Shinar (2004) and Ben-Yaacov et al. (2002) did not find differences between systems reliable at 60%, 80–85% and 90–95%. Subsequently, Wickens and Dixon (2007), after analyzing a total of 22 studies, concluded that 70% should be the threshold for considering a system as reliable.

Simulators have proved to be an excellent tool for the study of the FCWS, where different scenarios as well as the severity of collisions can be easily manipulated. Behavioral parameters are the measure used most frequently by researchers in driving simulator studies, as they are certainly a strong reflection of drivers' performance, but other techniques can also be used to obtain additional information that is not visible through drivers' performance. For example, the electroencephalography and the associated Event Related Potential (ERP) are effective tools that enable to dissociate the different stages of the information processing. Through these measures, it is possible to obtain information on anticipation/orienting, sensory and cognitive processes. Specifically, before the stimulus is presented, processes related to movement preparation and sensory anticipation (Bender et al., 2004) can be detected through the Contingent Negative Variation (CNV). Once the stimulus appears, the sensorial analysis of the stimulus can be reflected by components like the N1. This component is sensitive to the physical properties

of the stimulus and to the attention allocated to it (Hillyard and Anllo-Vento, 1998). The higher cognitive processing is reflected by the N2 and P3 components. Classically, the N2 component is elicited by tasks involving cognitive control, novelty stimuli, and perceptual matching and response conflict (Folstein and Van Petten, 2008). The P3 component can be used as a measure of the attentional resources allocation and working memory updating (Polich, 2007).

Thereby, a neural analysis of the brain electrical activity in drivers could offer novel and original information in assessing the effects of the FCWS. Nevertheless, its use in simulator studies is not widespread due to some constraints such as its sensitivity to saccadic or motor movements. Therefore, these types of studies are not very common in the literature, although those already existing showed a clear impact of a dual task situation at higher cognitive levels. For example, Strayer and Drews (2007) found that in a task where participants had to react to intermittent lead vehicle decelerations, the P3 amplitude was reduced and the P3 latency was delayed when they were engaged in phone conversations. Similarly, Rakauskas et al. (2005) studied the impact of secondary tasks while driving and detecting unexpected sounds (oddball paradigm). They found that the P3 amplitude to novel sounds was especially reduced by a cognitive secondary task presented by cell-phone, showing that the processing of novel information is deteriorated by the dual task.

This study aims to evaluate the impact of a surrogate FCWS and its reliability on drivers according to their attentional state. The main innovation of this research has been the recording of the brain electrical activity in drivers in order to complement information obtained from behavioral data with information on the neural stages of information processing, enabling to go further than existing results in the literature about the cognitive effects of the FCWS. Participants were required to drive following a lead motorcycle which braked frequently simulating possible collisions, while performing a cognitive secondary task (dual task) or not (simple task). In addition, the impact of the reliability of the system was analyzed by comparing a perfect system with a 70% reliable system. It was expected that the system, even when not perfect, be of benefit to both undistracted and distracted drivers.

2. Results

2.1. Behavioral results

Reaction times (RTs) were calculated for distraction level and warning conditions. A 2 (distraction level) $\times$ 3 (warning conditions) repeated-measures ANOVA showed a significant main effect of distraction level ($F(1,11)=20.68$, $p=.001$). The main effect of warning conditions was not significant and there were no interaction effects.

The analysis of the simple effects for the distraction level condition revealed faster RTs when participants were undistracted than when they were distracted in the three system conditions: no system (410 ms vs. 430 ms) ($F(1,11)=17.49$, $p=.002$), imperfect system (396 ms vs. 424 ms) ($F(1,11)=13.54$, $p=.004$), and perfect system (397 ms vs. 422 ms) ($F(1,11)=14.72$, $p=.003$). Despite the fact that the main effect of warning conditions did not reach statistical significance ($F(2,22)=2.85$, $p=.079$), further separate analysis showed that participants reacted faster when they were undistracted and warned by a perfect ($F(1,11)=5.71$, $p=.036$) or an imperfect system ($F(1,11)=7.32$, $p=.020$) than when they were not warned. No significant differences were found among the warning conditions when participants were distracted.

Concerning accuracy data, neither the main effects of distraction level (5% of errors in simple task and 9% in dual task) and warning conditions (6%, 6% and 8% of errors in no system, imperfect system and perfect system condition, respectively), nor the interaction effect were statistically significant.

2.2. ERP results

The amplitude and latency of the N1, N2, P3, as well as the amplitude of the N2–P3 complex and the CNV were analyzed with ANOVA for repeated measures with distraction and warning conditions as within subject factors (Table 1).

The ANOVA revealed a main effect of distraction level on the amplitude of all components studied and a main effect of warning conditions in the N2 component. Concerning the latency, only a main effect of warning conditions was found in the P3 component.

Table 1 – ANOVA for repeated measures on the amplitude of the CNV, N1, N2, P3, and N2–P3 complex and the latency of the N1, N2, and P3 with distraction level and warning conditions as factors.

	Amplitude			Latency		
	Distraction level $F(1,11)$	Warning conditions $F(2,22)$	Interaction $F(2,22)$	Distraction level $F(1,11)$	Warning conditions $F(2,22)$	Interaction $F(2,22)$
CNV	$F=6.04$, $p=.030^*$	$F=.45$, $p=.635$	$F=.99$, $p=.384$			
N1	$F=5.17$, $p=.044^*$	$F=.83$, $p=.440$	$F=1.43$, $p=.261$	$F=.27$, $p=.613$	$F=.88$, $p=.414$	$F=1.25$, $p=.303$
N2	$F=18.56$, $p=.001^{**}$	$F=3.97$, $p=.047^*$	$F=1.16$, $p=.324$	$F=.57$, $p=.465$	$F=3.40$, $p=.067$	$F=1.06$, $p=.352$
P3	$F=28.41$, $p=.0002^{***}$	$F=.64$, $p=.522$	$F=1.56$, $p=.236$	$F=.56$, $p=.470$	$F=5.34$, $p=.028^*$	$F=1.32$, $p=.282$
N2–P3	$F=49.47$, $p=.00002^{***}$	$F=3.20$, $p=.065$	$F=1.02$, $p=.372$			

* $p<.05$.
 ** $p<.01$.
 *** $p<.001$.

For post-hoc analysis, the impact of the distraction level (Section 2.2.1) and of the warning conditions (Section 2.2.2) on each component will be presented separately.

2.2.1. Impact of the distraction level (simple task, ST; dual task, DT)

This part of the results contrasts the ERPs of participants in ST and DT separately for the three warning conditions (Table 2 and Figs. 1 and 2).

Preceding the target onset, there was a main effect of distraction level on the CNV component. Further separate analysis only revealed a significant increase of the CNV amplitude in ST compared to DT when the perfect system was presented ($F(1,11)=7.14$, $p=.020$) (first column of Table 2 and Fig. 1).

After the target onset and only when no system was used, the maximum amplitude of the N1 was significantly reduced in DT compared to ST condition ($F(1,11)=9.06$, $p=.012$). This

Table 2 – Amplitude data (μV) of the CNV, N1, N2, P3, and N2–P3 components and latency data (ms) of the N1, N2, and P3 in the ANOVA for repeated measures with distraction level as factor in no system (NS), imperfect system (IS) and perfect system (PS) conditions.

	CNV ST; DT	N1 ST; DT	N2 ST; DT	P3 ST; DT	N2–P3 ST; DT
Amp					
NS	–5.75; –4.41	–9.83; –7.27*	–9.15; –5.53***	11.71; 8.92**	16.95; 11.48**
IS	–4.75; –3.86	–9.08; –7.98	–8.47; –6.41	12.68; 9.25**	17.49; 12.60**
PS	–5.49; –3.18*	–8.76; –7.15	–7.46; –5.01*	10.97; 9.56	14.85; 11.42**
Lat					
NS		213; 207	214; 214	343; 364	
IS		214; 213	212; 205	335; 337	
PS		209; 211	206; 205	325; 325	

* $p < .05$.

** $p < .01$.

*** $p < .001$.

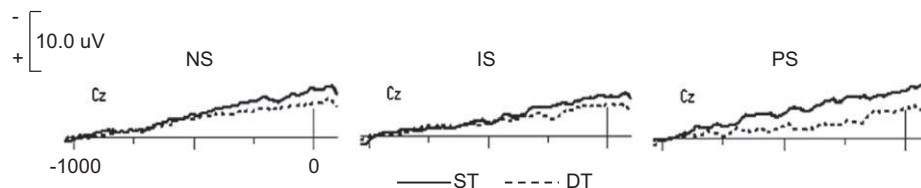


Fig. 1 – Grand average of the ERP showing the CNV at Cz in ST and DT for no system (NS), imperfect system (IS) and perfect system (PS) conditions.

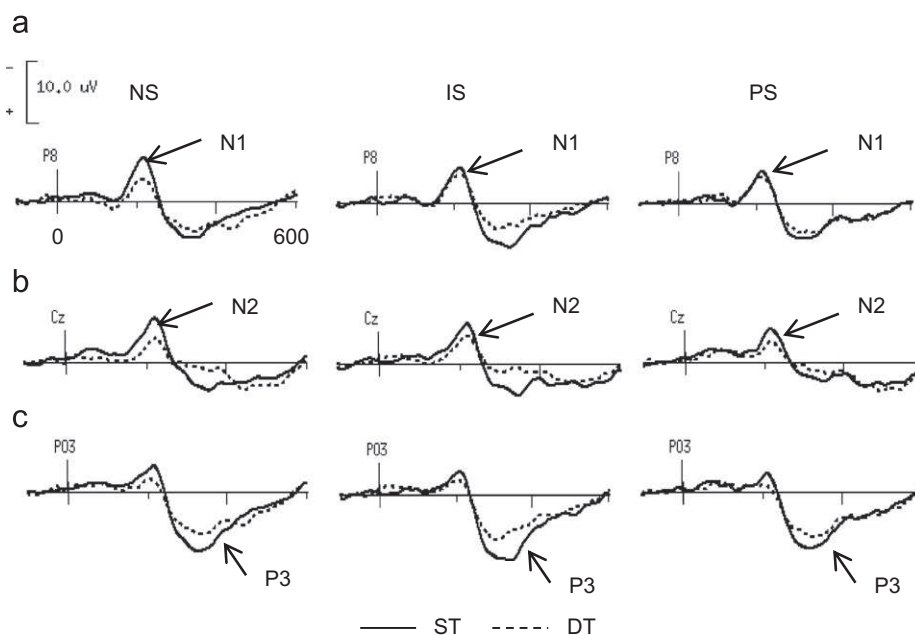


Fig. 2 – Grand average of the ERP showing (a) the N1 at P8, (b) the N2 at Cz, and (c) the P3 at PO3 in ST and DT for no system (NS), imperfect system (IS), and perfect system (PS) conditions.

difference was not significant when a system (perfect or imperfect) was used (second column of Table 2 and Fig. 2a).

Results showed a reduction of the maximum amplitude in the time window of the N2 component observed over Cz, in DT condition compared to ST for no system ($F(1,11)=23.70$, $p=.0005$) and for the perfect system ($F(1,11)=8.93$, $p=.012$). In the case of the imperfect system, this difference did not reach the criteria of significance ($F(1,11)=3.71$, $p=.080$) (third column of Table 2 and Fig. 2b).

The secondary task significantly reduced the maximum amplitude of the P3 component when there was no system ($F(1,11)=14.33$, $p=.003$) but also when an imperfect system was presented ($F(1,11)=11.77$, $p=.006$). Difference when using a perfect system was marginally significant ($p=.07$) (fourth column of Table 2 and Fig. 2c).

Finally, as illustrated in Fig. 2, it is noteworthy that the impact of the DT was less noticeable in the system conditions than in the no system condition: there were fewer significant differences when using a system than when no system was used, and, in particular, no significant difference was observed at the level of the visual N1 component.

2.2.2. Impact of the warning conditions according to the reliability (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS)

In this section, the three warning conditions have been compared in simple (Table 3 and Fig. 3) and in dual task separately (Table 4 and Fig. 4).

2.2.2.1. In simple task (ST).

There were no significant effects of the warning conditions in the CNV when participants were undistracted (ST) (first column of Table 3).

Fig. 3 shows the three warning conditions in simple task once the target has been presented. Regarding the N1 component (second column of Table 3 and Fig. 3a), no significant differences were found in amplitude and latency among the three warning conditions.

The presence of the PS significantly reduced the peak amplitude $F(1,11)=7.02$, $p=.023$ and latency $F(1,11)=13.70$, $p=.003$ of the N2 component compared to NS (third column of Table 3 and Fig. 3b). In the same way, the latency of the N2 was reduced by the presence of the PS compared to the IS $F(1,11)=6.09$, $p=.031$.

Table 3 – Amplitude data (μV) of the CNV, N1, N2, P3, and N2–P3 components and latency data (ms) of the N1, N2, and P3 in the ANOVA for repeated measures with warning conditions (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS) as factor in ST.

	CNV	N1	N2	P3	N2–P3
Amp					
NS–PS	–5.75; –5.49	–9.83; –8.76	–9.15; –7.46*	11.71; 10.97	16.95; 14.85*
NS–IS	–5.75; –4.75	–9.83; –9.08	–9.15; –8.47	11.71; 12.68	16.95; 17.49
PS–IS	–5.49; –4.75	–8.76; –9.08	–7.46; –8.47	10.97; 12.68	14.85; 17.49*
Lat					
NS–PS		213; 209	214; 207**	343; 325	
NS–IS		–213; 214	214; 212	343; 335	
PS–IS		–209; 214	207; 212*	325; 335	

* $p < .05$.

** $p < .01$.

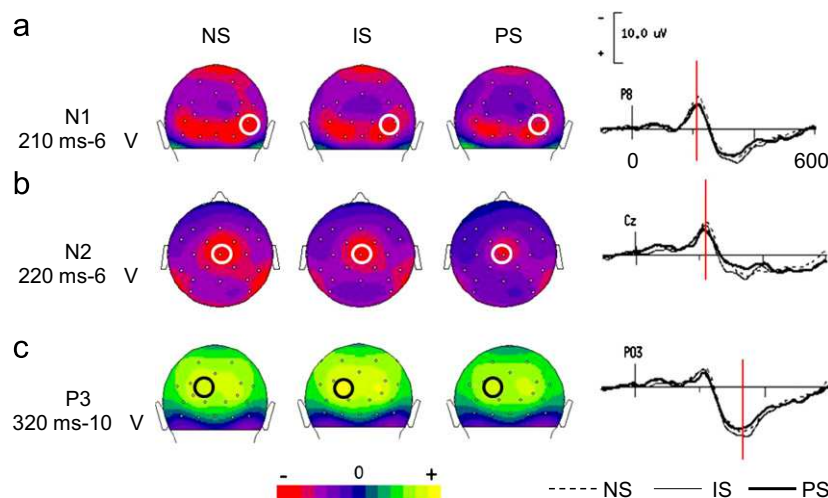


Fig. 3 – Topographic maps and grand averages of the ERPs showing (a) the N1, (b) the N2 and (c) the P3 components in ST for the three warning conditions (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS).

Table 4 – Amplitude data (μV) of the CNV, N1, N2, P3, and N2–P3 components and latency data (ms) of the N1, N2, and P3 in the ANOVA for repeated measures with warning conditions (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS) as factor in DT.

Warning	CNV	N1	N2	P3	N2–P3
Amp					
NS–PS	–4.41; –3.18	–7.27; –7.15	–5.53; –5.01	8.92; 9.56	11.48; 11.42
NS–IS	–4.41; –3.86	–7.27; –7.98	–5.53; –6.41	8.92; 9.25	11.48; 12.60
PS–IS	–3.18; –3.86	–7.15; –7.98	–5.01; –6.41**	9.56; 9.25	11.42; 12.60
Lat					
NS–PS		207; 211	215; 205	364; 325	
NS–IS		207; 213	215; 205	364; 337*	
PS–IS		211; 213	205; 205	325; 337	

* $p < .05$.

** $p < .01$.

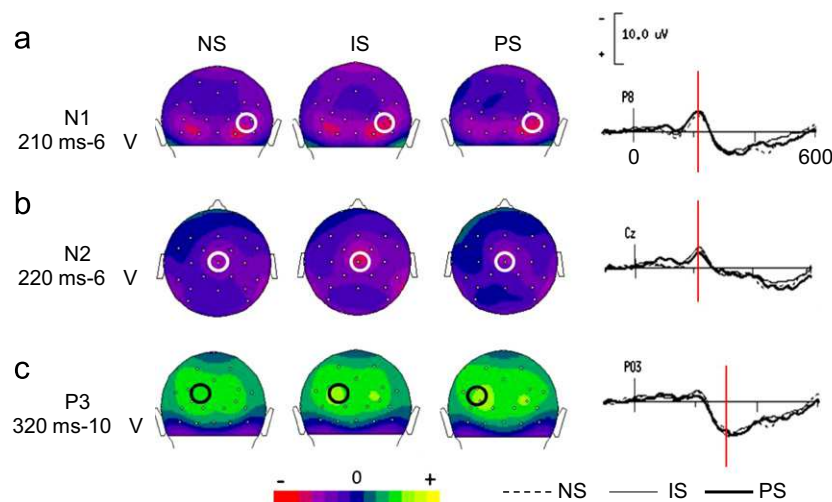


Fig. 4 – Topographic maps and grand averages of the ERPs showing (a) the N1, (b) the N2 and (c) the P3 components in DT for the three warning conditions (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS).

The latency of the P3 component (fourth column of Table 3 and Fig. 3c) was reduced by the PS compared to the absence of system; however, this difference was marginally significant $F(1,11)=4.78$, $p=.051$. No other comparisons in this component reached statistical significance.

2.2.2.2. In dual task (DT). As for the ST condition, no significant differences were found among the three warning conditions for the amplitude of the CNV component (first column of Table 4) and for the N1 component in amplitude or latency (second column of Table 4 and Fig. 4a).

As regards the N2 component (third column of Table 4 and Fig. 4b), its maximum amplitude was significantly decreased by the presence of the PS compared to the IS ($F(1,11)=10.13$, $p=.008$); however, differences between the PS or IS and the absence of the system failed to reach statistical significance. In the same way, for the P3 component (fourth column of Table 4 and Fig. 4c) no differences were found between the PS or IS and the absence of the system. Indeed, the peak wave appeared sooner for the PS than for the NS condition, although this difference was marginally significant $F(1,11)=4.21$, $p=.064$. Only the difference between IS and NS was statistically

significant $F(1,11)=8.04$, $p=.016$, showing a reduced latency in the IS compared to the NS.

3. Discussion

The aim of this study was to evaluate the impact of a Forward Collision Warning System and of its reliability according to the attentional state of drivers, by recording both behavioral data and the associated electrical brain responses.

The main findings of this work could be summarized as follows:

- (1) Perfect system had a positive effect at both behavioral and neural levels. Participants were faster in detecting the target when the system was completely reliable compared to no system at all. In addition, the analysis of the neural activity suggested a reduction of the time and the attentional resources required for processing the target correctly.
- (2) Imperfect system also had a positive effect on participants' performance compared to no system, showing

faster reaction times in detecting the braking of the motorcycle. However, this effect was not found at the neural level.

- (3) The secondary task had a disruptive effect on participants' performance and information processing of the target: reaction times were slower and the amplitude of N1, N2, and P3 was considerably reduced when participants were distracted in all warning conditions.
- (4) Perfect system was not effective enough to eliminate the disruptive effect of the dual task at behavioral and electrophysiological levels. Nevertheless, the analysis of the participants' electrical brain responses showed that the difference between undistracted and distracted drivers was lower when the perfect system was available.

Although the impact of the warning system was clearly observed at the behavioral level when drivers were undistracted, the only significant difference observed at the neural level occurred within the N2 component latency range. This effect corresponded mainly to a decrease of the amplitude and latency of the main component under Cz when the perfect system was used compared to no system at all. In addition, when drivers were undistracted, a decrease of this component was also observed when the perfect system was used compared to the imperfect system. This result could reflect a modulation of the neural activity at the level of the N2 which could be related to cognitive control (monitoring or regulation of strategy) (Folstein and Van Petten, 2008). The visual N1 and the N2 components presented different topographies, nevertheless, it is important to note that in our study, they shared the same time window and consequently they largely overlapped due to conduction properties: the visual N1 component spread over the scalp and partly contributed to the N2 component. Because of that, and despite some differential effects at the level of N1 and N2, it was difficult to determine whether the effect observed at the level of N2 was specifically due to a modulation of this component or whether it was partially due to a modulation of the N1 component linked rather to the sensory processing of the target. This discrepancy with traditional electrophysiological experiments using visual stimulations and showing a clear temporal distinction between the visual N1 and the N2 components might be due to methodological differences between experimental procedures, such as the use, here, of a dynamic visual driving scene.

Concerning the impact of the distraction level, the reaction time data revealed a clear deleterious effect of the secondary task, suggesting that the cognitive task diverted attention away from the driving task, regardless of the warning condition. This behavioral impact was associated with a general decrease of the amplitude of the event-related potentials when participants were distracted in the no-system condition. This result is in accordance with studies examining the impact of divided attention and could reflect the diminution of the attentional resources allocated to the target (e.g. Gherri and Eimer, 2011; Wickens et al., 1983).

Results revealed fewer differences between the event-related potentials curves recorded in the two distraction levels when using a perfect warning system than when no

system was used. With all due caution, it can be speculated that these fewer differences were due to a diminution of N1, N2, and P3 amplitude in simple task, even if this is significant only for N2 when using a perfect system compared to no system. This diminution was not visible on the event-related potentials obtained in dual task. The same pattern of results was observed for the imperfect system except at the level of the P3. This amplitude diminution when participants were undistracted could have been interpreted as a deterioration of the target processing following the presentation of the warning signal which could act as a distracting element. However, this interpretation seems unlikely due to the fact that reaction time data revealed a facilitation effect of the warning signal. An alternative explanation could be that the significant decrease of N2, as well as the tendency to decrease N1 and P3 when using a warning system, reflects temporal expectation. Indeed, in our study, when using the perfect system, the warning signal was predictive of the time window in which the target appeared. It is known that focusing attention on a point in time improves behavioral performance and increases preparatory activity time-locked to the expected target occurrence (Seibold et al., 2011). In addition, it has been shown recently that temporal expectation attenuates the amplitudes of visual N1 and N2 components (Correa et al., 2006; Doherty et al., 2005) and can also diminish the amplitude of P3 (Correa et al., 2006). We can assume that the warning improved the time expectancy already initiated by the visual information related to the decelerations (as reflected by the analysis of the CNV). The fact of obtaining fewer differences between the two distraction conditions at the neural level could be at least partially due to a facilitation of the information processing by the warning when participants were undistracted.

The positive impact of the warning system has already been shown in other studies (i.e. Abe and Richardson, 2006). For the simple task situation, the relation between behavioral and electrophysiological data in this study supported this effect. The perfect system was effective at both behavioral and electrophysiological levels in warning drivers of the braking of the motorcycle; the imperfect system was only effective at behavioral level. However, contrary to expectations, the effectiveness of the warning system was not demonstrated when participants were distracted, both at behavioral and electrophysiological levels. This suggests that in the dual task situation, the two tasks compete for the attentional resources available and that the warning was not automated and required a conscious cognitive control. Indeed, the driving task was relatively easy; therefore, when participants were undistracted, they could have enough attentional resources available to process the warning and to widely benefit from it. Because the secondary task consisted on a high cognitive demanding task and required a strong and continuous effort to solve the enigmas, participants may not have had enough resources to process the warning. This result is consistent with data from cognitive psychology experiments which predict that the disruptive effect of a secondary task is higher with a high-demanding task than with a low or medium-demanding task. Certainly, the difference between these results and the studies which found a positive effect of these systems in distracted drivers

could be explained by the level of difficulty of the secondary tasks. Whereas, in our study, the secondary task was high-demanding resulting in the ineffectiveness of the warning signal, other works which used less-demanding secondary tasks found the opposite pattern (i.e. Lee et al., 2002). Nevertheless, this explanation should be considered carefully because there is little research analyzing the effect of warning systems on both distracted and undistracted drivers and even less research comparing the impact of different levels of demanding secondary tasks on these systems.

Finally, another possible explanation of the warning ineffectiveness in distracted drivers in this study could be attributed to the presence of the other predictor of the target besides the warning: the deceleration of the motorcycle before the brake light. Therefore, in our study, participants could have used this visual information, instead of the warning signal, as the main predictive information for anticipating the target, due to it being more informative than the warning in the imperfect system condition and of course in the no system condition. The CNV results supported this interpretation, showing an anticipation of the target even in the no warning system condition and in the distraction condition.

A potential limitation of this study was the visual deceleration of the motorcycle before the brake light was turned on. This deceleration occurred during all trials and warning conditions. As already discussed, this could have weakened the warning efficiency, as participants could rely on this visual information. Certainly, the deceleration-brake light sequence might appear very often in real life but decelerations might also occur without brake-light illumination. Future research should try to dissociate the impact of these two predictive cues in order to better analyze the impact of a warning signal in driving.

Another factor which could have contributed to the general weak impact of the warning may be due to the variable timing between the warning signal onset and the target (from 1500 to 2300 ms). It is known that the moment when the warning is given has an impact on the efficiency of the warning system (Abe and Richardson, 2004). However, in this task, participants never experienced a real risk of collision. This is in order to avoid abrupt reactions and due to the fact that urgent situations are not experienced frequently on the road. Therefore, there was not a high perceived urgency to respond to the target even with the later warning signal. In addition, a complementary analysis comparing the early and the late warning reaction times showed a general reduction of the time needed to process the target when the system was presented than when no system was presented, regardless of the interval used. This result suggested that the same processes were involved in the processing of the warning justifying the joint analysis of the different interval conditions. However, further research examining the impact of the different intervals separately could increase the effect observed in this study particularly when participants were distracted.

Finally, the objective of this research was the study of a warning signal in a context that enabled to assess both behavioral and electrophysiological data. Given the constraints of the electroencephalography, the driving task had

to be simplified prioritizing the study of the warning signal in a more controlled context. Nevertheless, complementary research should be performed in a more ecological scenario before these results may be generalized.

4. Conclusion

The current proliferation of in-vehicle technology has entailed considerable research regarding the benefits of these systems but also their possible negative effects. It has been expected that warning systems are of benefit specifically to distracted drivers but, in light of these results, this benefit could depend on how much attention is claimed by a competitive activity. The distractive effect produced by external devices such as cell-phones has received considerable attention. Nevertheless, driver distraction could also be caused by internalized thoughts unrelated to the driving task (Regan et al., 2011); this issue has been less considered in the literature. Data presented in this study supported this important notion for road safety showing that being immersed in high cognitive level internal thoughts can have serious implications. This may result in a reduction of attentional resources for processing the relevant information, in longer reaction times or errors in detecting the relevant information. In addition, this type of distraction also compromises the effectiveness of the warning system, whether perfect or imperfect.

This experiment has been a first step in investigating the effect of the Forward Collision Warning System and their reliability according to the distraction level of drivers using an electrophysiological approach, an innovative and challenging technique in the driving context. Results obtained in this experiment are promising for future applications; however, further research is necessary for investigating the effect of different levels of reliability of the systems and their impact on drivers distracted by concurrent cognitive tasks of various attentional loads.

5. Experimental procedures

5.1. Participants

12 Right-handed men from 25 to 35 years old (mean: 30.6) took part in this experiment. None suffered from any neurological disorders and all had normal or corrected-to-normal sight and normal hearing. They had held a driving license for at least four years and declared that they drove at least 3000 km per year (mean: 16,042 km). 60% of participants declared that they had experience with driver assistance systems such as speed limiters (58%), in-vehicle navigation systems (42%) or cruise control (33%); however, none reported any kind of experience with Forward Collision Warning Systems. Written informed consent was obtained from each participant and they were financially compensated for their participation. The research protocol was approved by INRETS (now IFSTTAR) and the French national research ethics committee (Declaration of Helsinki).

5.2. Stimuli and procedure

Before the task began, participants were briefly informed about the procedure of the experiment. All participants were then given a 5-min practice session to familiarize themselves with the simulator. Afterwards, the electrodes were positioned and the experimental phase started.

Participants were required to drive on a simplified simulator composed of a screen, steering wheel and pedals. Their task was to follow a lead motorcycle located 40 m ahead while maintaining their lateral position along the road composed of several curves and intersections. They were instructed to press the accelerator pedal to its maximum which corresponded to a speed of 90 km/h. This instruction enabled to identify the reaction time more easily. No-traffic and foggy conditions were chosen specifically to reduce saccadic movements and to justify, to a certain extent, the frequent decelerations of the motorcycle presented pseudo-randomly from 6 to 12 s (mean 10 s). Participants had to remove their right foot from the accelerator pedal as fast as possible in response to the motorcycle's brake light (target). An auditory warning could forewarn participants that the motorcycle was going to brake soon. This warning was 500 ms long and consisted of five pulses at 2000 Hz frequency for 80 ms each one with a shorter pause (20 ms) between them. These parameters were chosen to increase the perceived urgency (Edworthy et al., 1991). The warning was presented randomly ranging from 1500 to 2300 ms (mean 1900 ms) in steps of 100 ms before the target, simulating a Forward Collision Warning System. Three warning conditions were designed and presented in separate blocks. In the no system (NS) condition, no warning was given. In the imperfect system (IS) condition, the warning was 70% reliable, 15% of the trials were false alarms (a warning was given when no collision was imminent) and the rest (15%) were misses (no warning was prompted before the visual target) (Fig. 5). In the perfect system (PS) condition, the visual target was always preceded by an auditory warning. 120 trials were presented in each warning condition which was divided into 4 blocks lasting around 6 min and containing 30 trials, except the imperfect condition which was longer (5 blocks lasting around 7 min and containing 34 trials) to include the same number of correct warning trials presented on the

perfect warning condition. Whatever the condition (perfect, imperfect or no system), participants were instructed to wait for the visual target before removing their foot from the pedal.

In different scenarios, participants had either to perform the visual detection task only (Simple Task, ST) or to perform the visual detection task as well as a secondary cognitive task (Dual Task, DT). Half of the participants started with the ST condition and half with the DT condition and they alternated between ST and DT every two scenarios to avoid monotony and boredom. The secondary task consisted in a problem-solving task called the “Mystery Word” inspired by the Remote Associate Test described by Mednick (1962). In this task, a set of three words with apparently no links between them was given orally to the participants who had to find a fourth word linked to each of the three words. This association could correspond to a semantic link, an expression,

a compound word or a synonymy. For example, a set of three words could be “necklace – bicycle – reaction”. In this case, a solution could be “chain”. Participants were told that this was not a rapidity task. The set of three words was reproduced once by a computer, leaving around 30 s before repeating the three words once again if the participant had not found the solution. After the next 30 s, if the participant had still not found the solution, the computer gave another set of three words. This avoided the possibility of the participants giving up if the problem seemed too hard. This secondary task was chosen because it minimized the interactions between the experimenter and the participant and only involved short answers (one word) from the participant. In this way, electrophysiological muscle artifacts due to the pronunciation of the answer were minimized. In addition, it was based on short statements that were easy to remember and several difficulty levels could be created.

Warning conditions and distraction levels were counter-balanced across participants. The experiment was conducted in two sessions with an interval of approximately 15 day. Each session lasted approximately two and a half hours. The participants were encouraged to keep as still as possible throughout the task and to keep eye movements to a minimum. They could take breaks if necessary between blocks to minimize tiredness and eye movements.

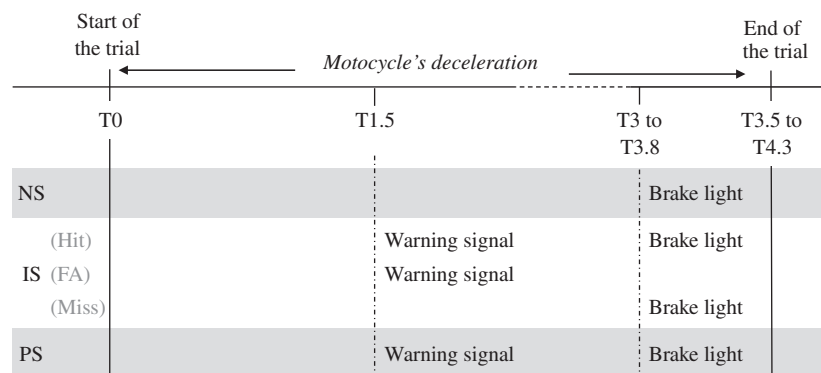


Fig. 5 – Experimental design for the three warning conditions (no system, NS; imperfect system, IS; perfect system, PS).

5.3. Data acquisition

The experimental room where participants carried out the experiment was equipped with a simplified simulator composed of a PC, a 24 in. screen, speakers, steering wheel and pedals. The stimulus presentation and response gathering on the traffic simulation were controlled with the IFSTTAR (French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks) simulator software architecture: ArchiSim2. The electrophysiological data were recorded using Biosemi ActiveTwo system (<http://www.biosemi.com/>).

An electrode cap containing 34 active electrodes with placement based on the International 10–20 System (Fz, Cz, Pz, Oz; Fp1, F7, F3, FC1, FC5, T7, C3, CP1, CP5, P7, P3, PO3, O1, IMA (midway Oz–Ma1)) and their counterpart on the right hemiscalp; Ma1 and Ma2 (left and right mastoids respectively) was used. Electrooculography activity (EOG) was recorded from the outer canthus of the right eye. An electrode placed near the corner of the mouth enabled to identify verbal responses during the secondary task. The reference electrode was located on the nose. For EEG and EOG, signals were acquired using ActiveTwo® Ad box, 24 bit ADC per channel sampled at 1024 Hz.

Offline, ERPs were extracted from EEG signals separately for the three warning conditions and according to the attentional state of the participant (simple task and dual task) using ELAN software (Aguera et al., 2011).

The stimulus presentation and data collection for the secondary task were performed by DMDX software (Forster and Forster, 2003).

5.4. Data analysis

Behavioral data analyzed was the corrected mean reaction time (RT) to the target stimuli. For each participant and each experimental condition, RTs that were faster/slower than mean value minus/plus three standard deviations were excluded to calculate the corrected mean RT for this participant in this block. The remaining RT measures were analyzed using 3×2 repeated measures ANOVA. The variables were all manipulated within subjects.

The ERP epochs for the CNV were computed from 1000 ms before the target to its onset and the signal was baselined from –1000 to –900 ms. Then, the data were digitally filtered down 60 dB at 0 Hz and 30 Hz. Concerning N1, N2, and P3, ERP epochs began 100 ms before the target stimulus and lasted 600 ms after the target onset. The data were baselined to the pre-stimulus activity and digitally band-pass filtered down 60 dB at .2 Hz and 30 Hz. Epochs were rejected if participants made no response to the target and if amplitude exceeded $\pm 200 \mu\text{V}$ at any scalp site as reflecting large artifacts linked to muscle activity or skin potentials (see Luck, 2005). Finally, signal was visually screened and any trial showing artifacts linked to eye movements or blinks was removed before average ERPs were calculated for target stimuli for each condition.

In each condition, an index of amplitude of the CNV component was estimated on electrode site Cz. It corresponds to the sum of the negative value divided by the number of temporal samples on a temporal window from

500 ms before the target to the onset of the target. The peak amplitude and the latency of the peak of the visual N1 component were detected in each participant on a time window from 150 to 275 ms and on electrode sites P7, P8, O1, O2, Ima, Imb. In the same way, amplitude and latency of the N2 component were detected on electrode sites Cz, FC1 and FC2 in the time window from 150 to 275 ms; amplitude and latency of the P3 were detected on a time window from 250 to 500 ms on P3, Pz, P4, PO3, PO4, CP1, and CP2. Finally, the maximum difference amplitude between the peak of N2 and the peak of P3 was estimated on the time window from 150 to 500 ms on CP1 and CP2. These electrode sites were chosen based on the scalp topography of each component at its maximum (see Figs. 3 and 4) and were consistent with locations observed in the literature (see for example, Folstein and Van Petten, 2008; Polich, 2007; Vogel and Luck, 2000). All these measures were submitted to a statistical two-way analysis of variance (ANOVA) with the distraction level and the warning conditions as factor and simple effects were estimated by post-hoc tests.

Acknowledgment

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007–2013) under Grant agreement no. 238833/ADAPTATION project. <http://www.adaptation-itn.eu/>.

REFERENCES

- Abe, G., Richardson, J., 2004. The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing. *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 7, 307–322.
- Abe, G., Richardson, J., 2006. Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Appl. Ergon.* 37, 577–586.
- Aguera, P.E., Jerbi, K., Caclin, A., Bertrand, O., 2011. Elan: a software package for analysis and visualization of MED, EEG, and LFP signals. *Comput. Intell. Neurosci.* 2011, 1–11.
- Bella, F., Russo, R., 2011. A collision warning system for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia—Soc. Behav. Sci.* 20, 676–686.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., Shinar, D., 2002. Effects of an in-vehicle collision avoidance warning system on short- and long-term driving performance. *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 44, 335–342.
- Bender, S., Resch, F., Weisbrod, M., Oelkers-Ax, R., 2004. Specific task anticipation versus unspecific orienting reaction during early contingent negative variation. *Clin. Neurophysiol.* 115, 1836–1845.
- Bliss, J.P., Acton, S.A., 2003. Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. *Appl. Ergon.* 34, 499–509.
- Correa, A., Lupiáñez, J., Madrid, E., Tudela, P., 2006. Temporal attention enhances early visual processing: a review and new evidence from event-related potentials. *Brain Res.* 1076, 116–128.
- Doherty, J.R., Rao, A., Mesulam, M.M., Nobre, A.C., 2005. Synergistic effect of combined temporal and spatial expectations on visual attention. *J. Neurosci.* 25, 8259–8266.

- Edworthy, J., Loxley, S., Dennis, I., 1991. Improving auditory warning design: relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Hum. Factors* 33, 205–232.
- Folstein, J.R., Van Petten, C., 2008. Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology* 45, 152–170.
- Forster, K.I., Forster, J.C., 2003. DMDX: a windows display program with millisecond accuracy. *Behav. Res. Methods, Instrum. Comput.* 35, 116–124.
- Gherri, E., Eimer, M., 2011. Active listening impairs visual perception and selectivity: an ERP study of auditory dual-task costs on visual attention. *J. Cogn. Neurosci.* 23, 832–844.
- Hillyard, S.A., Anllo-Vento, L., 1998. Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95, 781–787.
- Ho, C., Reed, N., Spence, C., 2006. Assessing the effectiveness of “intuitive” vibrotactile warning signals in preventing front-to-rear-end collisions in a driving simulator. *Accid. Anal. Prev.* 38, 988–996.
- Ho, C., Spence, C., 2009. Using peripersonal warning signals to orient a driver’s gaze. *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 51, 539–556.
- Kiefer, R.J., LeBlanc, D., Palmer, M., Salinger, J., Deering, R., Shulman, M., 1999. Forward Collision Warning Systems: development and validation of functional definitions and evaluation procedures for collision warning/avoidance systems. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- Knipling, R.R., Wang, J.S., Yin, H.M., 1993. Rear-end crashes: problem size assessment and statistical description. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- Kuge, N., Ueno, H., Ichikawa, H., Ochiai, K., 1995. A study on the causes of rear-end collision based on an analysis of driver behavior. *JSAE Rev.* 16, 55–60.
- Lee, J.D., McGehee, D.V., Brown, T.L., Reyes, M.L., 2002. Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator. *Hum. Factors* 44, 314–334.
- Lerner, N.D., Dekker, D.K., Steinberg, G.V., Huey, R.W., 1996. Inappropriate alarm rates and driver annoyance. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- Luck, S.J., 2005. An introduction to the event-related potential technique. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Maltz, M., Shinar, D., 2004. Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers. *Hum. Factors* 46, 357–366.
- Mednick, S.A., 1962. The associative basis of the creative process. *Psychol. Rev.* 69, 220–232.
- Mohebbi, R., Gray, R., Tan, H.Z., 2009. Driver reaction time to tactile and auditory rear-end collision warnings while talking on a cell phone. *Hum. Factors: J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 51, 102–110.
- National Highway Traffic Safety Administration, 2009. Traffic Safety Facts 2009: A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System. U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Parasuraman, R., Hancock, P.A., Olofinboba, O., 1997. Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. *Ergonomics* 40, 390–399.
- Polich, J., 2007. Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin. Neurophysiol.: Off. J. Int. Fed. Clin. Neurophysiol.* 118, 2128–2148.
- Rakauskas, M.E., Ward, N.J., Bernat, E.M., Cadwallader, M., Patrick, C.J., de Waard, D., 2005. Psychophysiological measures of driver distraction and workload while intoxicated. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design. Rockport, Maine.
- Regan, M.A., Lee, J.D., Young, K.L., 2008. Driver distraction: theory, effects and mitigation. CRC Press, Florida, USA.
- Regan, M.A., Hallett, C., Gordon, C.P., 2011. Driver distraction and driver inattention: definition, relationship and taxonomy. *Accid. Anal. Prev.* 43, 1771–1781.
- Seibold, V.C., Bausenhardt, K.M., Rolke, B., Ulrich, R., 2011. Does temporal preparation increase the rate of sensory information accumulation? *Acta Psychol.* 137, 56–64.
- Strayer, D.L., Drews, F.A., 2007. Multi tasking in the automobile. In: Kramer, A., Wiegmann, D., Kirlik, A. (Eds.), *Attention: From Theory to Practice*. Oxford University Press, New York, pp. 121–133.
- Sullivan, J.M., Tsimhoni, O., Bogard, S., 2007. Warning reliability and driver performance in naturalistic driving. University of Michigan Transportation Research Institute, Michigan.
- Vogel, E.K., Luck, S.J., 2000. The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology* 37, 190–203.
- Vogel, L., Bester, C.J., 2005. A relationship between accident types and causes. In: Proceedings of the 24th Southern African Transport Conference. South Africa.
- Wickens, C., Kramer, A., Vanasse, L., Donchin, E., 1983. Performance of Concurrent Tasks: A Psychophysiological Analysis of the Reciprocity of Information-Processing Resources. *Sci.* 221, 1080–1082.
- Wickens, C.D., Dixon, S.R., 2007. The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 8, 201–212.
- Zhu, B., 2001. Potential effects on accident rates from forward collision warning/avoidance system. Linköping University, Norrköping, Sweden.

4.3. Expérience 2 : Efficacité d'un système d'alerte anticollision en simple et double tâche d'un point de vue électrophysiologique

Bueno, M., Fort, A., Francois, M., Ndiaye, D., Deleurence, P., and Fabrigoule, C. (2013). Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective. Neuroscience Letters, 541, 219-223.

4.3.1. Objectif et justification

Cette deuxième étude visait à analyser l'efficacité du système anticollision en fonction de l'état attentionnel du conducteur en éliminant le biais d'anticipation provoqué par les décélérations de la moto.

4.3.2. Méthode

4.3.2.1. Population

Douze hommes de 25 à 35 ans (moyenne d'âge : 28.9 ans) ont participé à cette étude. Tous ont déclaré avoir eu le permis de conduire depuis au moins trois ans et avoir conduit au moins 3000 km par an au cours de la dernière année (moyenne : 9792 km). Les deux tests évaluant le fonctionnement cognitif utilisés dans la première étude nous ont permis de vérifier là encore l'absence de déficits cognitifs chez nos participants.

4.3.2.2. Protocole

Cette étude a été également menée dans le simulateur de conduite simplifié. La méthode était très similaire à l'étude précédente puisque les deux tâches (la tâche de conduite et la tâche de distraction cognitive) réalisées par les participants étaient identiques. La différence principale réside dans les décélérations de la moto. En effet, afin d'éliminer la possible valeur prédictive des décélérations initiales, nous avons ajouté des décélérations simples qui n'étaient suivies ni du signal avertisseur ni du feu stop. Toutefois, seules deux conditions de système ont été testées dans cette expérience : système imparfait et sans système (voir Figure 16).

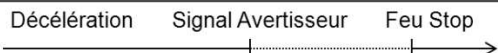
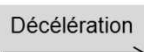
Type de Système	Type d'essai	Séquence
Sans Système	Sans Système	Décélération 
	Décélération Simple	Décélération 
Système Imparfait	Détection Correcte	Décélération 
	Fausse Alarme	Décélération 
	Défaut de Détection	Décélération 
	Décélération Simple	Décélération 

Figure 16. Séquence expérimentale pour chaque essai dans les deux conditions de système.

Comme dans l'étude précédente nous avons enregistré des mesures comportementales et des potentiels évoqués.

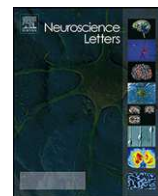
4.3.3. Discussion des principaux résultats

Au niveau électrophysiologique, le résultat de la composante VCN (anticipation) montre que la décélération dans ce nouveau protocole ne permet plus l'anticipation de la cible rendant ainsi possible l'analyse de l'efficacité du signal avertisseur en simple et double tâches.

Au niveau comportemental, nos résultats montrent un effet global du signal avertisseur ce qui suggère que le bénéfice est plus important dans cette étude que dans la précédente. La présence du signal a réduit les temps de réaction. En ce qui concerne les potentiels évoqués, une augmentation de l'amplitude de la composante VCN et une diminution de la latence de la P3 ont montré que le signal avertisseur agit au niveau des étapes préparatoires et cognitives du traitement de l'information.

De plus, nos résultats montrent un effet global de la double tâche et pas d'effet d'interaction entre les conditions système et distraction. Ainsi et bien que le signal semble plus efficace dans cette étude, l'absence d'interaction semble indiquer que le signal n'est pas capable de compenser l'effet négatif de la distraction. Il est possible que le niveau de difficulté de la tâche secondaire soit responsable de ce résultat. Ceci renforce l'hypothèse que le signal avertisseur nécessite des ressources attentionnelles pour être traité. Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, l'un des objectifs de notre prochaine étude sera de tester l'efficacité du signal avertisseur en fonction du niveau de la charge cognitive de la tâche secondaire.

4.4. Article 2



Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective

Mercedes Bueno^{a,b,c,*}, Alexandra Fort^{a,b}, Mathilde Francois^b, Daniel Ndiaye^d, Philippe Deleurence^{a,b}, Colette Fabrigoule^c

^a IFSTTAR-LESCOT, F-69675 Bron, France

^b University of Lyon, F-69622 Lyon, France

^c University Bordeaux Segalen, USR CNRS 3413 SANPSY, F-33076 Bordeaux, France

^d University of Paris-Est, IFSTTAR, IM, LEPSIS, F-75732 Paris, France

HIGHLIGHTS

- ▶ The effectiveness of the FCWS was assessed in undistracted and distracted drivers.
- ▶ Behavioural and electrophysiological data (ERP) was recorded in a simulator study.
- ▶ In undistracted drivers, the FCWS accelerated the detection of a potential obstacle.
- ▶ And it improved the anticipation (CNV) and the cognitive process of the target (P3).
- ▶ However, the effectiveness of the FCWS in distracted drivers was limited.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 December 2012

Received in revised form 7 February 2013

Accepted 14 February 2013

Keywords:

Forward Collision Warning System

Cognitive distraction

Anticipation

Event related potential

ABSTRACT

Forward Collision Warning Systems (FCWS) are expected to assist drivers; however, it is not completely clear whether these systems are of benefit to distracted drivers as much as they are to undistracted drivers. This study aims at investigating further the analysis of the effectiveness of a surrogate FCWS according to the attentional state of participants. In this experiment electrophysiological and behavioural data were recording while participants were required to drive in a simple car simulator and to react to the braking of the lead vehicle which could be announced by a warning system. The effectiveness of this warning system was evaluated when drivers were distracted or not by a secondary cognitive task. In a previous study, the warning signal was not completely effective likely due to the presence of another predictor of the forthcoming braking which competes with the warning. By eliminating this secondary predictor in the present study, the results confirmed the negative effect of the secondary task and revealed the expected effectiveness of the warning system at behavioural and electrophysiological levels.

© 2013 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Forward Collision Warning Systems (FCWS) have been introduced in the motor industry to assist drivers in preventing potential collisions. It is well known that the effectiveness of the system can strongly depend on different technical parameters. For example, the timing of the warning, the reliability of the system and/or the modality of the warning signal are some important elements to be considered when investigating FCWS [1,4,15]. Moreover, driver distraction could also have an impact on the effectiveness of the

system. Indeed, driver distraction has been identified as the main contributing factor for rear-end collisions [16]. Thus, it could be expected that these systems are of benefit to distracted drivers in particular, mitigating the negative effect of the competitive tasks by redirecting attention to the road and/or by promoting a response to avoid a potential collision [18]. Most research has showed positive effects of FCWS when drivers are undistracted [e.g., 13]. In the case of distraction, the system also seems to be effective [e.g., 20]; however, the impact of the distraction has not been systematically assessed by a control group, therefore it is not currently completely clear whether the warning system is of more benefit to distracted drivers.

At a more fundamental level, warning signals have also been demonstrated to be effective in reducing reaction time [25]. Moreover, it has been discussed that warning signals affect response

* Corresponding author at: IFSTTAR-LESCOT, 25 avenue François Mitterrand, F-69675 BRON, France. Tel.: +33 472142433; fax: +33 472376837.

E-mail address: mercedes.bueno-garcia@ifsttar.fr (M. Bueno).

selection and cognitive processes rather than sensory or motor processes [12,25]. The fact that dual tasks impair performance has been largely investigated [3,29]; however, whether warning signals are effective in reducing this negative effect and, if this had been true, at which stages of processing, remains less studied to our knowledge. To answer this question, techniques like electroencephalography (EEG) and the associated Event Related Potential (ERP) can be very valuable. Indeed, they enable to make a distinction among the different stages of information processing like anticipation processes (Contingent Negative Variation, CNV), sensory analysis of the stimulus (N1 component), and higher cognitive processing (P3 component).

ERPs have been used in order to examine the dual task costs in non-driving studies. For example, Guerri and Eimer [11] found that when participants had to perform a visual detection task at the same time that they had to listen to a story to posteriorly answer some questions, the amplitude of the N1, N2, and P3 components were reduced in comparison to when participants only had to perform the visual detection task [see also 10]. In the driving domain, ERP studies have been used mainly to examine the fatigue effects and vigilance while driving. There are only a few ERP driving simulator studies showing the disrupting effect of performing a concurrent cognitive secondary task [see, for example, 6, 24], and this technique has only been implemented recently in the study of advanced driver assistance systems and, specifically, in the study of FCWS [7].

The present study completes a series of experiments from our laboratory investigating the effectiveness of a warning signal by recording both behavioural and electrophysiological data. In a non-driving study performed on a computer, Fort et al. [10] analysed the effect of an auditory warning signal on the detection of a simple visual target according to the attentional state of the participants, distracted or not by a secondary cognitive task. The warning could precede the target either in 100% of the cases (perfect condition) or in only 70% of the cases (imperfect condition). The negative effect of the secondary task was evident through behavioural data and ERP data at the level of the CNV, the amplitude of the N1, and the amplitude and latency of the P3. In addition, faster reaction times when the warning (perfect and imperfect conditions) was available were observed. This result was confirmed by ERP data at the level of the CNV, the amplitude and latency of the N1, and the latency of the P3.

Afterwards, in a “driving” study, Bueno et al. [7] used a similar protocol adapted on a simplified driving simulator to investigate the effect of a surrogate FCWS in a driving context. Participants were required to drive and to react by decelerating when the brake light (target) of the lead motorcycle was illuminated. The reliability of a warning system (perfect, imperfect or no system) in predicting the brake light and the drivers' attentional state (undistracted or distracted by a secondary cognitive task) were manipulated. The results showed a negative effect of the secondary task at behavioural and ERP levels (CNV, N1, and P3 amplitude). However, unexpectedly and contrary to the previous non-driving study, the results only showed an effect of the warning signal at the level of the P3 latency. A possible explanation could come from the experimental design. Indeed, an initial deceleration of the motorcycle occurred systematically before braking in all trials, with or without the occurrence of the warning signal. Thus, participants may have used this motorcycle deceleration as a better predictor of the brake light occurrence than the warning signal which was not always reliable.

Therefore, the current study aims at eliminating the predictive value of this motorcycle deceleration for the forthcoming brake light in order to better evaluate the impact of an FCWS according to the drivers' attentional state. For this, simple deceleration trials that were not followed by the brake light were

added in a similar protocol than the one used in Bueno et al. [7]. This change in the experimental design should increase the predictive value of the warning signal and, consequently, its effectiveness. Moreover, this would provide a more realistic context as, in real driving conditions, vehicles can also decelerate only by releasing the accelerator and without pressing the brake.

2. Methods

2.1. Participants

12 right-handed men (mean age: 28.9 years, SD: 3.8) took part in the experiment. All participants had at least six years of driving experience and they drove at least 3000 km per year (mean: 9792 km). None suffered from any neurological disorders and none reported any kind of experience with FCWS. Written informed consent was obtained from each participant and they were financially compensated for their participation.

2.2. Materials/apparatus

This experiment was conducted in a simplified driving simulator composed of a PC, a 24 in. screen, steering wheel, and pedals. The stimulus presentation and response gathering on the traffic simulation were controlled with the IFSTTAR simulator software architecture, ArchiSim.

The electrophysiological data was recorded with Biosemi ActiveTwo system (<http://www.biosemi.com/>). A cap containing 32 active electrodes placed according to the International 10–20 System and two additional electrodes placed on the Ma1 and Ma2 (left and right mastoids respectively) were used. Electrooculography activity (EOG) was recorded from the outer canthus of the right eye. An electrode placed near the corner of the mouth enabled to identify verbal responses during the secondary task. The reference electrode was located on the nose. For EEG and EOG, signals were acquired using ActiveTwo® Ad box, 24 bit ADC per channel sampled at 1024 Hz. Offline, ERPs were extracted from EEG signals separately for the two warning conditions in simple and in dual task using ELAN software [2].

2.3. Procedure

Before the task began, all participants were given a 5 min practice session to familiarise themselves with the driving task on the simulator and with the secondary cognitive task, separately. Afterwards, the electrodes were positioned and the experimental phase started.

Participants were required to drive actively on the simulator following a lead motorcycle located 40 m ahead. They were instructed to press the accelerator pedal to its maximum which corresponded to a speed of 90 km/h. This instruction enabled to identify the reaction time (RT) more easily. Foggy and no-traffic conditions were chosen specifically to reduce saccadic movements and to justify, to a certain extent, the frequent decelerations of the motorcycle (lasting between 2 and 3 s.) presented randomly from 4 to 7 s. Participants had to remove their right foot from the accelerator pedal as fast as possible in response to the motorcycle's brake light (target). An auditory warning could forewarn participants that the motorcycle was going to brake soon. This warning was 500 ms long and consisted of five pulses at 2000 Hz frequency for 80 ms each one with a shorter pause (20 ms) between them. These parameters were chosen to increase the perceived urgency [8]. The warning was presented randomly ranging from 1500 to 2300 ms (mean 1900 ms) in

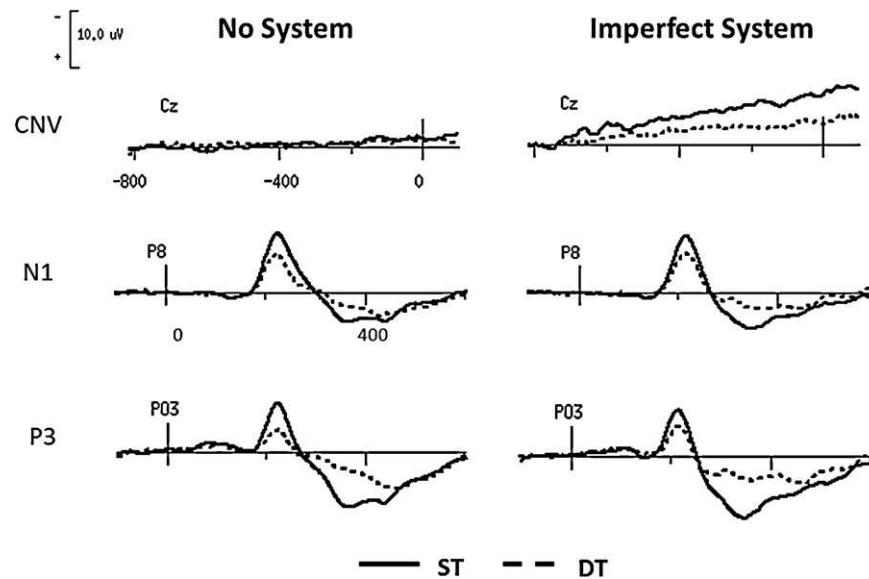


Fig. 1. Grand average of ERP showing the CNV at Cz, the N1 at P8, and the P3 at PO3 for no system and for imperfect system condition in simple task (ST) and in dual task (DT).

steps of 100 ms before the target. Two warning conditions¹ were designed and presented in separate blocks.

The *No System* (NS) condition was composed of 318 trials divided into six blocks lasting around 5 min. In 62% of the trials ($n = 198$), the target (brake light) was presented preceded by the deceleration of the motorcycle. The remaining 38% of the trials were simple deceleration events that were not followed by the brake light (to remove the predictive value of the motorcycle decelerations). These trials were excluded from the analysis. The *Imperfect System* (IS) condition was composed of 424 trials divided into eight blocks lasting around 6 min. As in the NS condition, 38% of the trials were simple decelerations that were not analysed. In the remaining 62% of the trials, the warning was reliable to announce the brake light in about 76% ($n = 200$) and non-reliable in about 24% ($n = 64$) of the trials (about 12% of the trials were false alarms and about 12% were misses).

In each warning condition, participants either had to perform the visual detection task only (Simple Task, ST) or to perform the visual detection task as well as a secondary cognitive task (Dual Task, DT). A quarter of the participants started with the no system condition in ST and another quarter with the no system condition in DT. Similarly, a quarter of the participants started with the imperfect system condition in ST and another quarter with the imperfect system condition in DT. In addition, ST and DT conditions were alternated every two blocks in the imperfect condition, or every three blocks in the no system condition, in order to avoid monotony and boredom. The secondary task consisted in a problem-solving task called the “Mystery Word” inspired by the Remote Associates Test described by Mednick [21]. In this task, a set of three words with apparently no links between them was given orally to the participants who had to find another word linked to each of the three words. Further details of this task can be found in Bueno et al. [7].

The experiment was conducted in one session lasting approximately 3 h. The participants were encouraged to keep as still as possible throughout the task and to keep eye movements to a

minimum. They could take breaks if necessary between blocks to minimize tiredness and eye movements.

2.4. Data analysis

The behavioural data analysed was the corrected mean RT to the target stimuli: for each participant and each experimental condition (false alarms and misses were not analysed). RT that were faster/slower than mean value minus/plus three standard deviations were discarded from the data analysis. The corrected mean RT was analysed using a $2(\text{distraction level}) \times 2(\text{warning conditions})$ repeated measures ANOVA.

The ERP epochs for the CNV were computed from 800 ms before the target to its onset and the signal was baselined from -800 to -700 ms. Then, the ERPs from each electrode were digitally filtered (low-pass filter with a 30 Hz cut-off, slope 60 dB/octave). Concerning N1 and P3, ERP epochs began 100 ms before the target stimulus and lasted 600 ms after the target onset. The data was baselined to the pre-stimulus activity and digitally band-pass filtered down 60 dB at 0.2 Hz and 30 Hz. Epochs were rejected if participants made no response to the target and if amplitude exceeded $\pm 150 \mu\text{V}$ at any scalp site as reflecting large artefacts linked to muscle activity or skin potentials [see 19]. Finally, signals were visually screened and any trial showing artefacts linked to eye movements or blinks (detected by Fp1 and Fp2 electrodes) was removed before average ERPs were calculated for target stimuli for each condition.

In each condition, an index of amplitude of the CNV component was estimated on electrode site Cz. It corresponds to the sum of the negative value divided by the number of temporal samples on a temporal window from 200 ms before the target to the onset of the target. The peak amplitude and the latency of the peak of the visual N1 component were detected on a time window from 150 to 275 ms and on electrode sites P7, P8, O1, O2, Ima, Imb. In the same way, amplitude and latency of the P3 were detected on a time window from 250 to 500 ms on Pz, P3, P4, PO3, PO4, CP1, and CP2. These electrode sites were chosen based on the scalp topography of each component at its maximum and were consistent with locations observed in the literature [see for example, 9, 23, 28]. All these measures were submitted to a statistical two-way analysis of variance (ANOVA) with distraction level and warning conditions as factors.

¹ The perfect system condition was excluded from this experiment, as it was considered that perfect systems are not realistic systems, and in order to reduce the duration of the study.

Table 1

Amplitude data (μV) of the CNV, N1, and P3, and latency data (ms) of the N1 and P3 components.

	CNV		N1		P3	
	NS	IS	NS	IS	NS	IS
Amplitude (μV)						
ST	−1.74	−5.26	−12.15	−12.97	12.03	12.46
DT	−2.00	−2.78	−8.80	−9.99	8.06	8.07
Latency (ms)						
ST			222	216	405	365
DT			218	216	435	372

3. Results

3.1. Behavioural results

The 2×2 repeated-measures ANOVA showed a significant main effect of distraction level ($F(1,11) = 44.99$, $p < .001$) indicating that participants reacted significantly faster when they were undistracted (466 ms in NS and 439 ms in IS; mean: 452 ms) than when they were distracted (524 ms in NS and 490 in IS; mean: 506 ms). The main effect of warning condition ($F(1,11) = 8.68$, $p = .013$) was also significant showing faster reaction times with the presence of the warning system (mean: 465 ms) compared to its absence (mean: 494 ms). The two-way interaction failed to reach significance.

3.2. ERP results

The amplitude of the CNV as well as the amplitude and latency of the N1 and P3 were submitted to repeated-measures ANOVA.

Regarding the impact of the warning condition (Fig. 1 and Table 1), a main effect in the CNV amplitude ($F(1,11) = 5.13$, $p = .045$) and in the P3 latency ($F(1,11) = 6.71$, $p = .025$) was found. Indeed, the amplitude of the CNV was larger in the imperfect condition ($-4.02 \mu\text{V}$) than in the no system condition ($-1.87 \mu\text{V}$). In addition, the latency of the P3 was reduced in the presence of the system (369 ms) compared to no system (420 ms).

Concerning the impact of the distraction level (Fig. 1 and Table 1), a marginal effect was found on the CNV amplitude ($F(1,11) = 4.48$, $p = .058$) and a main effect was obtained on the amplitude of the N1 ($F(1,11) = 26.55$, $p < .001$) and of the P3 components ($F(1,11) = 17.09$, $p = .002$). The amplitude of the CNV, N1, and P3 was lower in the DT ($-2.39 \mu\text{V}$; $-9.40 \mu\text{V}$; $8.07 \mu\text{V}$, respectively) than in the ST condition ($-3.50 \mu\text{V}$; $-12.56 \mu\text{V}$; $12.25 \mu\text{V}$, respectively) and the latency of the P3 was longer in DT (404 ms) than in ST (385 ms). No interaction effects were found between the distraction levels and the warning conditions.

4. Discussion

The aim of this experiment was to investigate further the effectiveness of the FCWS when drivers were distracted eliminating an experimental bias presented in Bueno et al., [7] i.e. the predictive value of the motorcycle decelerations related to the forthcoming occurrence of the brake light. The result showing that decelerations were no longer predictive of the brake light comes from the neuroimaging results. Specifically, CNV data showed that no anticipation of the brake light occurred when no warning system was available. At the behavioural level, the presence of the warning system reduced the RTs compared to no system at all. At the ERP level, no differences between the two warning conditions were found concerning the N1 component, indicating that the warning system did not seem to facilitate the sensory processing of the target, but the presence of the system seemed to reduce the peak latency of

the P3 component compared to no system at all. This result could be interpreted as a diminution of the time required to process the target at higher cognitive level.

Although the warning system proved to be effective in a non-driving study conducted in our lab [10], it appeared to be ineffective in our previous “driving” study [7]. We hypothesized that this discrepancy came from the presence of another predictor to the brake light which competes with the warning signal: the deceleration of the motorcycle which was always linked to the brake light in the “driving” study [7]. After removing the predictive value of this deceleration by adding decelerations trials not linked to the brake light, results revealed the effectiveness of the warning system. It is interesting to note that the trials analysed in this study and those analysed in the previous one were very similar. They all were composed of a deceleration followed by the brake light. The difference came only from the context since trials with decelerations not linked to the brake light were introduced only in the present study. Braver and Barch [5] highlighted the importance to present the information relevant to the task. When two or more events compete for the same response, the relevant information will be processed over other competing sources of information. In our previous “driving” study, the motorcycle deceleration was more relevant because it was always predictive of the brake light; in contrast, the warning signal was less relevant because of the presence of the false alert trials.

At ERP level, the main difference between the two “driving” experiments was evidenced through CNV data. As mentioned above, when decelerations were no longer predictive of the target, drivers’ capacity to anticipate the target when no warning system was available was drastically reduced as reflected by the amplitude decrease of the CNV by about 70%. Consequently, an increase of the predictive value and the effectiveness of the warning system has been observed in this study by faster RTs, by an increase of the amplitude at the level of the CNV, and by a reduction of the peak latency of the P3 in the presence of the warning system.

Findings from this study evidenced that the warning signal operates at preparatory (CNV) and higher cognitive (P3) stages. These results are consistent with Hackley and Valle-Inclán [12] who found in a non-driving context that the warning signal accelerated the lateralized readiness potential, a component also involved in the process of motor preparation as for the CNV. Concerning the influence of the warning signal at the level of the P3, our results are congruent with non-driving studies showing a reduction of the latency of the P3 by the warning [12,25].

Consistently with previous research works in non-driving [11] as in driving domain [6], a robust negative impact of the secondary task at behavioural and electrophysiological levels has been observed in this study as in our two previous studies [7,10]. However, as no interaction was observed in this study, it seems that the warning signal was not able to compensate the negative effect of the dual task. What has to be further examined is whether the warning system is able to eliminate or at least to reduce the impact of the secondary tasks. To our knowledge, there are not a lot of studies investigating the impact of a warning signal in a dual task. Therefore, further research should be done to investigate this phenomenon at a fundamental level in a non-driving context but also specifically in a driving context, since warning systems are supposed to be helpful especially for distracted drivers.

It could be possible that the effectiveness of the warning is affected by the difficulty level of the secondary task as well as the type of warning system. According to the literature, auditory and visual-auditory warnings seem to be effective in helping drivers to detect potential collisions when they are distracted by a visual secondary task [15,17]. In this experiment, visual warnings were avoided in order to limit the eye movements (artefact to the ERP); however, given that the secondary task had an auditory component

and the warning signal was also auditory, a multimodal warning could have been more effective than the auditory one [22,27]. This is consistent with results of behavioural studies in driving simulator [14] and also ERP studies in non-driving related context [26], showing that multimodal warnings are more effective than unimodal warnings.

Finally, the complementarity of the behavioural and ERP data observed in these studies encourages further investigations into the effectiveness of some driver assistance systems by considering the use of electrophysiological data in simulators.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007–2013) under grant agreement No. 238833/ADAPTATION project. www.adaptation-itn.eu.

References

- [1] G. Abe, J. Richardson, The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing, *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 7 (2004) 307–322.
- [2] P.E. Aguera, K. Jerbi, A. Caclin, O. Bertrand, Elan A software package for analysis and visualization of MED, EEG, and LFP signals, *Comput. Intell. Neurosci.* 2011 (2011) 1–11.
- [3] A.D. Baddeley, Exploring the central executive, *Q. J. Exp. Psychol.* 49A (1996) 5–28.
- [4] J.P. Bliss, S.A. Acton, Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving, *Appl. Ergon.* 34 (2003) 499–509.
- [5] T.S. Braver, D.M. Barch, A theory of cognitive control, aging cognition, and neuromodulation, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 26 (2002) 809–817.
- [6] M.P. Bruyas, A. Chapon, T. Lelekov-Boissard, D. Letisserand, M. Duraz, I. Aillerie, Evaluation de l'impact de communications vocales sur la conduite automobile, *Recherche Transports Sécurité* 91 (2006) 99–119.
- [7] M. Bueno, C. Fabrigoule, P. Deleurence, D. Ndiaye, A. Fort, An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task, *Brain Res.* 1470 (2012) 69–79.
- [8] COMSIS Corporation, Preliminary Human Factors Guidelines for Crash Avoidance Warning Devices COMSIS, 1996.
- [9] J.R. Folstein, C. Van Petten, Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review, *Psychophysiology* 45 (2008) 152–170.
- [10] A. Fort, B. Collette, M. Bueno, P. Deleurence, A. Bonnard, Impact of totally and partially predictive alert in distracted and undistracted subjects: an event related potential study, *Accid. Anal. Prev.* 50 (2013) 578–586.
- [11] E. Guerri, M. Eimer, Active listening impairs visual perception and selectivity: an ERP study of auditory dual-task costs on visual attention, *J. Cogn. Neurosci.* 23 (2011) 832–844.
- [12] S.A. Hackley, F. Valle-Inclán, Which stages of processing are speeded by a warning signal? *Biol. Psychol.* 64 (2003) 27–45.
- [13] C. Ho, N. Reed, C. Spence, Assessing the effectiveness of intuitive vibrotactile warning signals in preventing front-to-rear-end collisions in a driving simulator, *Accid. Anal. Prev.* 38 (2006) 988–996.
- [14] C. Ho, N. Reed, C. Spence, Multisensory in-car warning signals for collision avoidance, *Hum. Factors* 49 (2007) 1107–1114.
- [15] C. Ho, C. Spence, Using peripersonal warning signals to orient a driver's Gaze, *Hum. Factors* 51 (2009) 539–556.
- [16] R.R. Knipling, J.S. Wang, H.M. Yin, Rear-end crashes: problem size assessment and statistical description, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, 1993.
- [17] J.D. Lee, D.V. McGehee, T.L. Brown, M.L. Reyes, Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator, *Hum. Factors* 44 (2002) 314–334.
- [18] J.D. Lee, M.L. Ries, D.V. McGehee, T.L. Brown, M. Perel, Can Collision Warning Systems Mitigate Distraction Due to In-Vehicle Devices? NHTSA Driver Distraction Internet Forum, Rockville, Maryland, 2000.
- [19] S.J. Luck, An introduction to the Event-Related Potential technique, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2005.
- [20] M. Maltz, D. Shinar, Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid distracted drivers *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 10 (2007) 345–357.
- [21] S.A. Mednick, The associative basis of the creative process, *Psychol. Rev.* 69 (1962) 220–232.
- [22] R. Mohebbi, R. Gray, H.Z. Tan, Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone, *Hum. Factors* 51 (2009) 102–110.
- [23] J. Polich, Updating, P300: an integrative theory of P3a and P3b, *Clin. Neurophysiol.* 118 (2007) 2128–2148.
- [24] M.E. Rakauskas, N.J., Ward, E.M., Bernat, M., Cadwallader, C.J., Patrick, D. de Waard, Psychophysiological measures of driver distraction and workload while intoxicated 3rd International Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, Rockport, Maine, 2005.
- [25] A.P. Rudell, B. Hu, Does a warning signal accelerate the processing of sensory information? Evidence from recognition potential responses to high and low frequency words, *Int. J. Psychophysiol.* 41 (2001) 31–42.
- [26] V. Santangelo, R. Van der Lubbe, M. Olivetti Belardinelli, A. Postma, Multisensory integration affects ERP components elicited by exogenous cues, *Exp. Brain Res.* 185 (2008) 269–277.
- [27] United Nations, Guidelines on establishing requirements for high-priority warning signals, Economic Commission for Europe, Geneva, 2011.
- [28] E.K. Vogel, S.J. Luck, The visual N1 component as an index of a discrimination process, *Psychophysiology* 37 (2000) 190–203.
- [29] C. Wickens, The structure of attentional resources, in: R. Nickerson (Ed.), *Attention and Performance*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1980, pp. 239–257.

4.5. Expérience 3 : Adaptation comportementale et efficacité d'un système d'alerte anticollision en fonction de la tâche secondaire cognitive

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

4.5.1. Objectif et justification

Les deux expériences précédentes ont porté sur l'impact du signal avertisseur sur l'analyse du traitement de l'information lors de l'utilisation d'un système anticollision. À l'aide de mesures de potentiels évoqués nous avons pu préciser les étapes du traitement qui sont influencées par le signal avertisseur. Cependant, l'utilisation de cette technique nous a contraints à utiliser un simulateur et des scénarios de conduite extrêmement simplifiés. Dans cette troisième étape, nous avons souhaité regarder, à l'aide d'un simulateur de conduite plus réaliste, l'adaptation comportementale au système. Des changements comportementaux lors de l'utilisation du système peuvent survenir pendant les premières utilisations (phase d'apprentissage), mais aussi après une exposition plus longue au système (phase d'intégration) (Saad et al., 2004). En général, les systèmes anticollision ont montré des bénéfices pendant la phase d'apprentissage. Cependant, les effets à plus long terme mais aussi les conséquences de l'absence du système après la phase d'intégration ont été moins étudiés.

Par ailleurs, les résultats des expériences précédentes ont suggéré que le signal avertisseur nécessitait des ressources attentionnelles pour être traité et, en conséquence, sa faible efficacité dans les expériences antérieures pourrait être liée à la haute charge cognitive de la tâche secondaire employée. Selon l'hypothèse formulée dans la Figure 17, le signal avertisseur pourrait être plus efficace si la tâche secondaire est moins demandante cognitivement. Ainsi, cette expérience a pour second objectif d'étudier l'efficacité du signal en fonction de deux niveaux de difficulté de la tâche secondaire cognitive.

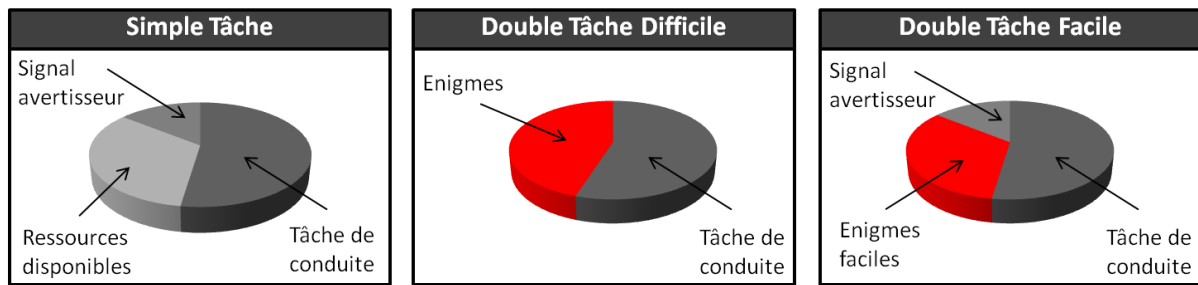


Figure 17. Schéma illustrant les ressources attentionnelles disponibles pour traiter le signal avertisseur en simple tâche et en double tâche difficile et facile.

4.5.2. Méthode

4.5.2.1. Population

36 conducteurs de 25 à 40 ans (50% d'hommes ; moyenne d'âge : 31.1 ans) ont participé à cette étude. Ils avaient obtenu leur permis de conduire depuis au moins trois ans et avaient conduit au moins 3000 km par an au cours de la dernière année (moyenne : 14883 km). Les deux tests d'évaluation des fonctions cognitives nous ont permis de vérifier l'absence de déficits cognitifs chez ces participants.

4.5.2.2. Protocole

L'absence de mesures des potentiels évoqués nous a permis de réaliser cette étude sur un simulateur de conduite plus réaliste (voir section 3.2.3.). Ainsi, le contexte fourni par la cabine de simulation et les écrans, mais aussi la tâche de conduite, plus proche d'une conduite réelle (gestion plus libre de la vitesse, décor plus riche, trafic, etc.), ont contribué à favoriser une plus grande immersion des participants dans cette expérience que dans les précédentes.

La tâche des participants était de suivre un véhicule et d'éviter, en décélérant et en freinant si nécessaire, les possibles collisions. Les participants ont été répartis en trois groupes :

- Le groupe SF a conduit avec le système et a réalisé une tâche de faible charge cognitive.
- Le groupe SH a conduit avec le système et a réalisé une tâche de haute charge cognitive.
- Le groupe SSF ou groupe contrôle a conduit sans le système et a réalisé une tâche de faible charge cognitive.

Le système anticollision était fiable à 75%. Pendant la condition de double tâche, les participants ont réalisé la tâche du « mot mystère » avec des associations entre les trois mots plus ou moins évidentes à trouver selon le groupe (distraction cognitive faible ou haute définies à partir des taux de réussite aux énigmes).

Comme le montre la Figure 18, cinq scénarios de conduite consécutifs ont été définis. L'ensemble des participants ont conduit sans le système pendant la première phase (scénario 1) pour obtenir la ligne de base. Ensuite, pendant la deuxième phase d'apprentissage et intégration, seuls les groupes SF et SH conduisaient avec le système. Le groupe SSF continuait à conduire sans système. Cette deuxième phase était composée successivement de trois scénarios :

- Scénario 2 : permettant d'évaluer les effets d'apprentissage du système (groupes SF et SH).
- Scénario 3 : permettant d'évaluer l'efficacité du système en fonction du niveau de difficulté de la tâche secondaire (groupes SF et SH) et impact de la double tâche (groupes SF et SSF).
- Scénario 4 : permettant d'évaluer les effets d'intégration du système et les effets résiduels dus à la distraction préalable.

Enfin, dans la troisième phase « système inactif » (scénario 5), le système n'était plus disponible pour les groupes SF et SH dans le but d'analyser les conséquences de l'arrêt du système après une brève adaptation.

	1ère Phase Ligne de Base	2ème Phase Apprentissage et Intégration			3ème Phase 'Système Inactif'
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Groupe SF (n=12)	Sans Système	Système	Système+ distraction Faible	Système	Sans Système
Groupe SH (n=12)			Système+ distraction Haute		
Groupe SSF (n=12)		Sans Système	Sans Système + distraction Faible	Sans Système	
	10'	15'	15'	15'	10'
	Durée (min)				

Figure 18. Design expérimental montrant les conditions système et distraction pour chacun des trois groupes pendant les cinq scénarios.

4.5.3. Discussion des principaux résultats

L'analyse des données de cette expérimentation a montré que le groupe contrôle présentait un profil de résultats particulier. En effet, ce groupe a montré une modification progressive des performances, avec, par exemple, des temps de réaction de plus en plus lents ou des distances de sécurité de plus en plus courtes du premier au dernier scénario. Cette détérioration a été interprétée comme une adaptation progressive à la tâche de conduite sur simulateur qui est restée constante tout au long de l'expérience.

Concernant l'adaptation comportementale au système, nos données ont montré que l'introduction du système a eu un effet positif pendant la phase d'apprentissage avec des temps de réaction plus rapides et des distances de sécurité plus longues notamment.

La réalisation de la tâche secondaire, facile comme difficile, a eu un effet délétère sur la performance des participants. Cependant, cet effet n'a pas été équivalent en fonction du niveau de la charge cognitive de la tâche secondaire. L'effet négatif de la tâche de distraction facile a été partiellement compensé par le système, les performances montrant toujours un bénéfice du système par rapport à la ligne de base. En revanche, avec la tâche de distraction difficile, le système n'a pas permis d'améliorer les performances par rapport à la ligne de base. Ainsi, la moindre efficacité du système lorsque la tâche secondaire est difficile (demande en ressources plus coûteuse) est en accord avec notre hypothèse stipulant que le traitement du signal avertisseur nécessiterait des ressources attentionnelles.

Une fois la tâche secondaire arrêtée, les performances des groupes conduisant avec le système ont été légèrement améliorées. Mais nous avons de nouveau trouvé des effets différents en fonction du niveau antérieur de difficulté de la double tâche. En effet, le groupe ayant réalisé auparavant la tâche de distraction facile a montré des performances similaires à celles obtenues lors de la phase d'apprentissage. En revanche, le groupe ayant réalisé auparavant la tâche difficile n'a pas récupéré ce niveau et son niveau de performance est plus similaire à celui correspondant à la ligne de base. Ainsi, ce résultat suggère que l'efficacité du système est affectée par la réalisation d'une tâche à haute charge cognitive, non seulement de façon immédiate mais aussi que cela affecte la phase d'intégration.

Enfin, quand le système n'était plus disponible, après la phase d'intégration, nous n'avons pas observé d'effet de transfert. Cependant, la performance des deux groupes avec le système est similaire à celle correspondant au niveau de la ligne de base montrant qu'il n'y a pas eu non plus d'adaptation négative au système.

4.6. Article 3

Behavioural adaptation and effectiveness of a Forward Collision Warning System depending on a secondary cognitive task. Soumis à *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*.

Mercedes Bueno^{a,b,c,*}, Colette Fabrigoule^c, Daniel Ndiaye^d, and Alexandra Fort^{a,b},

^a IFSTTAR-TS2-LESCOT, Cité des Mobilités, 25 avenue François Mitterrand, case 24, F-69675 Bron, France

^b University of Lyon, F-69622 Lyon, France

^c University Bordeaux Segalen, USR CNRS 3413 SANPSY, CHU Pellegrin, F-33076 Bordeaux, France

^d University of Paris-Est, IFSTTAR, COSYS, LEPSIS, F-77447 Marne la Vallée, France

* Corresponding author at IFSTTAR-TS2-LESCOT, Cité des Mobilités, 25 avenue François Mitterrand, case 24, F-69675, Bron, France.

Tel: +33472142433 Fax: +33472376837

E-mail: mercedes.bueno-garcia@ifsttar.fr

Abstract

Forward Collision Warning Systems (FCWS) have been designed to enhance road safety by reducing the number of rear-end collisions. Nevertheless, little is known about how drivers adapt their behaviour

over time when using this kind of system. In addition, these systems are expected to aid particularly distracted drivers. However, previous research has suggested that the effectiveness of the system could depend on the difficulty level of the secondary task. The objective of this study on driving simulator was twofold. Firstly, it consisted in evaluating the behavioural adaptation to an FCWS as well as analysing the possible consequences of driving without the system after a short period of adaptation. Secondly, it was to evaluate the effectiveness of the system according to two different difficulty levels of a cognitive secondary task. The results showed that drivers adapted their behaviour positively when the system was introduced. Nevertheless, both the effectiveness and the behavioural adaptation in the short term were dependent on the cognitive load induced by the secondary task. These findings suggest that the warning needs some attentional resources to be processed. Finally, no negative or transfer effect was observed following the removal of the system after a short period of adaptation.

Keywords

Driving simulator; Forward Collision Warning System; Behavioural adaptation; Distraction; Cognitive load; Attentional resources

1. Introduction

The increasing development of Advance Driver Assistance Systems (ADAS) and In-Vehicle Information Systems (IVIS), as well as the progressive availability of equipped vehicles, are having an impact on driving safety. These systems are expected to induce positive and safer behaviours in driving, especially when providing assistance to drivers in critical situations. But even if these systems are designed to facilitate the driving task, they could also modify drivers' behaviour negatively. Some examples concerning expected and unexpected behavioural changes related to the use of ADAS are found in the literature. For example, the use of an Intelligent Speed Adaptation system in a simulator study resulted in positive effects since drivers reduced their maximum speed in low speed limit areas compared to participants driving without the system (Comte, 2000). Nevertheless, more risky behaviour was also associated with the presence of this system, such as accepting smaller gaps when merging onto a road with approaching traffic and spending more time at short headways. Concerning the Lane Departure Warning, it seems that both accurate and less accurate systems could improve lane-keeping performance compared to a control group receiving no warning. However, those participants who initially drove with the accurate system kept a high rate of trust in the system even when it became inaccurate (Rudin-Brown & Noy, 2002). These are only a few examples of the positive and negative behavioural changes associated with the use of some ADAS. But literature has often showed contradictory results regarding the same system type (for review, see Saad et al., 2004) which could be due, among other factors, to different methodologies (driving simulator, on-road tests, etc.). This underlines the need for more research on this topic.

This study is focused on the behavioural adaptation to a particular assistance system, the Forward Collision Warning System (FCWS). Such a system has been designed to reduce and/or to avoid rear-end collisions by warning drivers when forward obstacles are detected.

Certainly, behavioural changes could appear during the first contacts with the system (learning phase) when drivers are learning how the system works, but also after a longer period of exposure (integration phase) once drivers have acquired a higher level of experience with the system (Saad et al., 2004). In general, the results concerning FCWS have been obtained after a brief exposure to the system in short-term studies. These studies have shown the positive value of the FCWS reflected, for example, by a reduction of the number of collisions (Lee et al., 2002), by faster braking reaction times following the detection of critical situations (Abe & Richardson, 2006), by the adoption of longer and safer headways (Ben-Yaacov et al., 2002), and by returning attention to the critical direction when necessary (Ho & Spence, 2009). These results provide evidence of the positive impact of the system during the learning phase. However, most of the past experimental studies counterbalanced periods with and without the system. Therefore, it is not possible to fully understand the effect of introducing the system for the first time. In addition, some authors insist on the fact that these systems also have longer-term effects on drivers' behaviours. However, with regard to the FCWS, there is a gap in knowledge concerning the behavioural adaptation effects in the integration phase. Another important issue is to observe how drivers could react if the system is switched off (for example, because of a malfunctioning of the system) after a short or longer use. If drivers become dependent on the aid of the system, then they could be very vulnerable in the case of potential hazards if the system is no longer available. However, if drivers consider the system as an assistant and not as a surrogate driver, then they could transfer the positive effect of the system even if it is no longer available.

This issue of potential transfer effects of an FCWS in the short term and in the long term were examined in the Ben-Yaacov et al. (2002) study, conducted in a field operation test. In this study, participants had to drive in real traffic conditions, firstly without (1st trial) and afterwards with the FCWS (2nd trial). In addition, the authors investigated the immediate effects of switching off the system in a third trial as well as the long-term effects of switching off the system in a fourth trial conducted six months later. The results showed that participants adopted safer headways when they were driving with the system (2nd trial) and that they were able to transfer this positive effect when the warning assistance was no longer available (3rd trial). Interestingly, this effect was also observed six months later (4th trial). To our knowledge, the work of Ben-Yaacov et al. (2002) is the only study examining the behavioural effects of switching off an FCWS over time.

FCWS are expected to be of benefit to distracted drivers in particular. In general, the studies comparing the effectiveness of the system between undistracted and distracted drivers showed that undistracted drivers benefited as much as distracted drivers (see for example, Ho & Spence, 2009; Kramer et al., 2007; Lee et al., 2002). However, among these studies, the focus is mainly put on the effectiveness of the system when drivers were visually distracted. It could be possible that the system may have different effects according to the modality of the distraction task. For example, Mohebbi, Gray, and Tan Mohebbi et al. (2009) found that when participants were involved in complex conversations (mental calculation and categorization questions), only a tactile warning was effective but not an auditory warning. In addition, previous experiments on a simplified simulator (Bueno,

Fabrigoule, Deleurence, Ndiaye, & Fort, 2012; Bueno et al., 2013) showed that an FCWS (auditory warning) was not able to compensate for the negative effects of a cognitive secondary task on brake RT. From this result, it was hypothesised that the warning signal may need some attentional resources to be processed. In order to test this hypothesis in this study, the effect of the cognitive secondary task load was analysed. In a broader sense, it is known that the amount of attentional resources available is considerably reduced by the presence of a competitive task (A. D. Baddeley, 1996; Wickens, 1980). Moreover, if the primary or the secondary task (or both tasks) are highly demanding, participants might not have enough attentional resources to treat them. Thus, in a driving context, dealing with a demanding cognitive secondary task may result in a deterioration of the driving behaviour. In this regard, Harbluk, Noy, Trbovich, and Eizenman (2007) investigated the effects of different difficulty levels of a cognitive secondary task while participants drove in an on-road experiment. Their results showed that the driving behaviour was negatively affected, as the secondary task difficulty increased: participants spent more time looking towards the central areas of the road, less time looking at the peripheral areas and mirrors, and more hard braking trials occurred. Similarly, Jamson and Merat (2005) found in a simulator study that, as the demands of both a visual and a cognitive secondary task increased, the safety margins were gradually reduced and participants reduced the driving speed. Concerning the effect of an FCWS, if the warning signal needs attentional resources to be treated, it would be expected that high demanding secondary tasks could reduce the effectiveness of the system.

The objective of this study was twofold. Firstly, this work aimed at evaluating the behavioural adaptation to an auditory FCWS on the first uses, after a short-term period, and when driving without the system after this short period of adaptation. Secondly, the effectiveness of the FCWS was analysed according to different difficulty levels of a cognitive secondary task. We hypothesised that the system would only be effective when the secondary task was less cognitively demanding.

For this, participants were required to drive in a driving simulator during five consecutive scenarios. The FCWS was not available during the first scenario (baseline). Then, an incompletely reliable system was introduced in the second, third, and fourth scenarios in order to evaluate the immediate effect of introducing an FCWS as well as the behavioural adaptation to the system in the short term. Moreover, during the third scenario, participants had to drive and perform a slightly or a highly demanding secondary task. Finally, the consequences of switching off the system after a short period of adaptation were analysed during the fifth scenario where the system was no longer available.

2. Method

2.1. Participants

36 participants (18 men, 18 women) from 25 to 40 years old (mean 31.1) took part in this experiment. 14 additional participants were unable to complete the experiment because of simulator sickness. Participants were divided into three groups: group SL (System, Low distraction) drove with the FCWS and carried out a low difficulty secondary task; group SH (System, High distraction) also drove with the

FCWS but performed a high difficulty secondary task; and group NL (No system, Low distraction) drove without the system and performed a low difficulty secondary task.

None suffered from any neurological disorders and all had normal or corrected-to-normal sight and normal hearing. They had held a driving licence for at least five years and declared regular driving (mean: 14883 km/year). 61% of participants had experience with driver assistance systems such as in-vehicle navigation systems (42%), cruise control (33%) or speed limiters (22%), but none reported any kind of experience in using Forward Collision Warning Systems. Written informed consent was obtained from each participant and they were financially compensated for their participation. The research protocol was approved by the ethics committee of the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR).

2.2. Apparatus

The experiment was performed in the fixed-base car driving simulator of the Laboratory for Road Operations, Perception, Simulators and Simulations (LEPSiS) at IFSTTAR. The simulator was composed of a Peugeot 308 vehicle cab and five screens (220 cm high x 165 cm wide) providing a 180° horizontal and 47° vertical forward field of view. Three monitors (48 cm high x 56 cm wide), one placed at the interior and two at the exterior of the vehicle, enabled participants to monitor the rear view through the rear mirrors.

Road images were projected at an average frequency of 58.8 Hz, and driving data were recorded at the same frequency.

2.3. Driving scenario

The driving task was divided into five scenarios along different two-lane rural roads with medium traffic flow. The speed limit was set at 90 km/h and the visibility conditions were reduced due to fog.

Participants were required to drive at 90 km/h following a lead vehicle and they were instructed to avoid the possible collisions by decelerating. Overtaking manoeuvres were not allowed. The lead vehicle was located at 50 m headway which corresponded to 2 s headway at a driving speed of 90 km/h.

The FCWS could help participants to anticipate the possible collisions by an auditory alert reliable at 75%. This reliability level was chosen as it has been demonstrated that 70% could be the criteria from which a system can be considered as an aid for drivers (Wickens & Dixon, 2007). The warning was 500 ms long and consisted of five pulses at 2000Hz frequency for 80 ms each one with a shorter pause (20 ms) between them. These parameters were chosen to increase the perceived urgency of the alert (Edworthy et al., 1991).

Different braking trials were designed in each scenario:

- Firstly, in the less hazardous trials, the lead vehicle decelerated for 3 s until reaching a minimal headway of 0.8 s. When the FCWS was available, the warning was triggered at 911 ms after the onset

of the trial, which corresponded to the start of the lead vehicle deceleration, and at the same time the brake lights were illuminated. This timing corresponded to 1.64 s headway if the driving speed at the onset of the trial was set at 90 km/h.

- Secondly, during the more hazardous trials, the lead vehicle decelerated for 2.5 s to reach a minimal headway of 0.8 s. The warning was prompted (when available) and the brake lights were illuminated at 486 ms (1.77 s headway) after the onset of the trial. The warning timing in both types of trials was calculated by the Stop Distance Algorithm (ISO 15623, 2002).

- Thirdly, because the FCWS was reliable at 75%, two types of system failures were included in the scenarios where the FCWS was activated. Miss trials were defined as a failure of the system to prompt the warning when the situation required it, and false alert trials were characterized by the presence of a warning when no collision was imminent.

- In addition, in order to avoid participants finding out that no collision with the lead vehicle was possible (as the minimal headway was always set at 0.8 s to minimize strong braking and therefore simulator sickness), one critical braking trial was added in which the minimal headway was reduced to 0.68 s. For this trial, the warning timing (when the system was available) was set at 486 ms and brake lights were illuminated at the same time. As the purpose of this trial was not relevant for the research questions of this study, it was excluded from the analysis.

- Finally, no critical braking trials were included where the lead vehicle decelerated slightly only for 911 ms without brake lights and without warning. The purpose of these trials was to avoid the initial deceleration of the vehicle being predictive of the dangerousness of the trial and participants responding systematically without evaluating the risk of each situation. These trials were also excluded from the analysis.

During the first and fifth scenarios, lasting around 10 min each, the FCWS was not activated. In each scenario, 34 braking trials were presented pseudo randomly every 12 to 22 s (mean 17 s): 12 less hazardous (50%), 12 more hazardous (50%), 1 critical braking and 9 uncritical braking trials.

The second, third, and fourth scenarios lasted around 15 min each and 45 braking trials, presented pseudo randomly every 12 to 22 s, were included. Groups SL and SH driving with the FCWS received 12 less hazardous (37.5%), 12 more hazardous (37.5%), 4 misses (12.5%), 4 false alerts (12.5%), 1 critical braking and 12 uncritical braking trials. Group NL driving without the FCWS received 14 less hazardous (50%), 14 more hazardous (50%), 1 critical braking and 16 uncritical braking trials.

2.4. Secondary task

The secondary task consisted in a problem-solving task called the “Mystery Word” inspired by the Remote Associate Test described by (Mednick, 1962). In this task, a set of three words with apparently no links between them was given to the participants who had to figure out a fourth word linked to each of the three words. This association could correspond to a semantic link, an expression, a compound word or a synonymy. For example, an enigma could be “cream – skate – water”. In this case, a solution could be “ice”. Participants were told that this was not a rapidity task. The enigma was reproduced once by a computer, leaving about 30 s before repeating the three words once again if the

participant had not found the solution. After the next 30 s, if the participant had still not found the solution, the computer gave another enigma. This task is thought to induce cognitive distraction to the participants and one of its advantages is that different difficulty levels could be created. Thus, two lists with different difficulty levels were elaborated based on the percentage of correct responses given by participants in previous experiments (Bueno et al., 2012; Bueno et al., 2013; Fort, Collette, Bueno, Deleurence, & Bonnard, 2013). The low difficulty list was mostly composed of low difficulty enigmas (the percentage of correct responses ranged from 70 to 100% in previous experiments) although 38% medium difficulty enigmas (40 to 70% of correct responses) were interspersed among them. The high difficulty list was mostly composed of high difficulty enigmas (0 to 40% of correct responses) and 28% medium and low difficulty enigmas were also included in the list to avoid participants being frustrated and giving up if they could not find any solution.

2.5. Experimental design and procedure

12 participants were randomly assigned to each of the three experimental groups which differed in system condition (system/no system) and/or distraction condition (low distraction/high distraction) (see Table 1). Before the task began, participants were briefly informed about the procedure of the experiment. All participants were given a 5-10 min training session for both the secondary task and the driving task separately. The driving scenario in this session was similar to the scenarios described above and no warning was available at this stage.

Table 1. Experimental design showing the system and distraction conditions for each of the three groups along the five scenarios.

	1 st Phase		2 nd Phase		3 rd Phase
	Baseline		System Learning and Adaptation		"System off"
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Group SL	No system	System	System + Low distraction	System	No system
Group SH			System + High distraction		
Group NL		No system	No system + Low distraction	No system	
	10 min	15 min	15 min	15 min	10 min
	Duration				

After the training session, the first experimental phase started and the three groups drove without the system and without any distraction during scenario 1 to obtain the baseline.

The second phase of the experiment (system learning and adaptation phase) was composed of scenarios 2, 3, and 4. The two groups driving with the FCWS activated (groups SL and SH) received warnings at this stage, contrary to the control group (group NL). Groups SL and SH were informed that the system could help them to anticipate the possible collisions although, occasionally, it could malfunction. No information about the reliability level of the system was given to the participants. The immediate effects of introducing the system were observed during scenario 2 for the two system groups. The secondary task was only performed concurrently to the driving task during scenario 3. The high difficulty secondary task was carried out by group SH and the low difficulty secondary task was carried out by groups SL and NL. Thus, the effectiveness of the system according to different difficulty levels of the secondary task was examined by comparing performances of groups SL and SH. The impact of the system when drivers were distracted by a low secondary task was evaluated by comparing performances of groups SL and NL. The impact of the system when drivers were distracted by a high difficulty task was not studied in this experiment in order to reduce the number of experimental groups. Moreover, it was assumed that if the low secondary task has a negative effect, this result would also be expected with the high secondary task. During scenario 4, groups SL and SH continued to drive with the system in simple task condition to extend the adaptation to the system and to evaluate its effects after being distracted.

The last phase of the experiment (scenario 5) was dedicated to investigating the immediate effects of driving without the system assistance after a short period of using it.

The control group (group NL) drove during the whole experiment without the FCWS in order to analyse the system effects by comparing its performance with the other two system groups. In addition, it also took into account the adaptation to the simulator and the fatigue effects.

Participants had a break after the first phase (baseline) and the second one (system learning and adaptation) although they were told that they could take more breaks if needed. In order to discard possible cognitive deficits, two paper and pencil cognitive tests: the Trail Making Test, part A and B (Reitan, 1958) and the Digit Symbol Substitution Test (Wechsler, 1981) were administrated to the participants during the breaks. Moreover, a task load index was estimated using an adaptation of the NASA TLX (Hart & Staveland, 1988) after each scenario. Finally, at the end of the second phase of the experiment, groups SL and SH completed the French version of the Acceptance Scale for the system (Van der Laan, Heino, & De Waard, 1997) and they also indicated the estimated level of trust in the system on a scale from 0 to 100%.

The total duration of the experiment was approximately 2 and a half hours.

The dependent variables recorded in this experiment were:

- Brake reaction time defined as the time between the onset of the trial (start of the lead vehicle deceleration) and the braking. Trials in which participants braked before 350 ms were considered as premature responses and were excluded from the analysis.
- Time to collision (TTC) defined as the distance between the lead and the following vehicles divided by their relative speeds.
- Maximum deceleration time corresponding to the time elapsed between the initial and the maximum brake press.

- Mean deceleration calculated as the difference between the maximum and the minimum speed on each trial divided by the time taken.
- Driving speed was the average speed from the onset to the end of each scenario excluding intersection sections, where no trials were presented.
- Task load index resulted in six ordinal variables: mental demand, effort, discouragement, irritation, stress, and annoyance on a 5-point Likert scale (from a little to a lot).
- Acceptance of the system composed of nine questions resulting in two scores: satisfying and usefulness on a 5-point Likert scale (from -2 to +2).
- Trust in the system estimated by a 10-point Likert scale (from 0 to 100%).

2.6. Data analysis

Non-parametric tests were used since most of the variables were not normally distributed. The Kruskal-Wallis and the Mann Whitney tests were used to compare the performances between the groups in the different scenarios and the Wilcoxon test was used to compare the performances of each group between the different scenarios.

In order to eliminate individual differences among the three groups at the baseline, difference scores were calculated by subtracting the baseline score (scenario 1) from the score in each of the following scenarios (scenarios 2, 3, 4, and 5).

3. Results

The analysis of the data was carried out taking into account the more hazardous trials only. The less hazardous trials were not analysed because the deceleration response of the participants was initiated on average (groups SL and SH mean: 828 ms) before the alert was triggered (911 ms).

No significant differences were found in terms of age, gender, and driving experience among the three groups and no participant was excluded based on the results of the performances in the cognitive tests.

3.1. Analysis of the secondary task performance

The percentage of correct responses given by the participants during the secondary task confirmed that the high distraction task was more difficult than the low distraction task. Indeed, participants in group SH spent more time trying to resolve the enigmas and they received fewer enigmas (mean = 21) than groups SL (mean = 35) or NL (mean = 34). Moreover, the percentage of correct responses was 32.9% for the high distraction task (group SH), 67.6% and 68.2% for the low distraction task performed in group SL and in group NL, respectively.

3.2. Analysis of the driver performance

The results of the difference scores from the baseline concerning the driver performances through the five variables recorded in this experiment can be observed in Table 2 and Figure 1.

Table 2. Mean and standard deviation (SD) of the brake RT, TTC, maximum deceleration time, mean deceleration, and driving speed (differences from the baseline) for the groups SL (System, Low distraction), SH (System, High distraction), and NL (No system, Low distraction) during the different scenarios.

Dependent variable	Group	Scenario 2 mean (SD)	Scenario 3 mean (SD)	Scenario 4 mean (SD)	Scenario 5 mean (SD)
RT (ms)	Group SL	-152 (± 99)	-74 (± 96)	-117 (± 97)	64 (± 122)
	Group SH	-122 (± 127)	-15 (± 167)	-67 (± 98)	69 (± 179)
	Group NL	63 (± 119)	104 (± 163)	122 (± 124)	180 (± 128)
TTC (s)	Group SL	0.77 (± 0.70)	0.32 (± 0.51)	0.57 (± 0.66)	-0.39 (± 0.68)
	Group SH	0.92 (± 1.00)	-0.30 (± 1.01)	0.08 (± 0.77)	-0.65 (± 1.25)
	Group NL	-0.36 (± 0.74)	-0.42 (± 1.64)	-0.68 (± 1.12)	-0.76 (± 0.77)
Maximum deceleration time (s)	Group SL	0.09 (± 0.07)	0.09 (± 0.10)	0.07 (± 0.16)	-0.04 (± 0.18)
	Group SH	0.06 (± 0.13)	0.04 (± 0.16)	0.02 (± 0.11)	-0.13 (± 0.15)
	Group NL	-0.02 (± 0.14)	-0.11 (± 0.08)	-0.12 (± 0.10)	-0.16 (± 0.10)
Mean deceleration (m/s)	Group SL	0.09 (± 0.53)	-0.09 (± 0.62)	-0.11 (± 0.75)	-0.29 (± 0.79)
	Group SH	0.11 (± 0.48)	-0.08 (± 0.68)	0.27 (± 0.76)	0.03 (± 0.97)
	Group NL	-0.19 (± 0.41)	-0.43 (± 0.62)	-0.69 (± 0.46)	-0.64 (± 0.67)
Driving speed (km/h)	Group SL	3.1 (3.0)	0.8 (± 3.2)	4.4 (± 4.4)	4.5 (± 6.2)
	Group SH	2.2 (± 3.1)	0.6 (± 5.1)	3.7 (± 3.5)	3.3 (± 3.9)
	Group NL	2.8 (± 2.1)	3.1 (± 3.8)	5.5 (± 3.0)	5.1 (± 3.3)

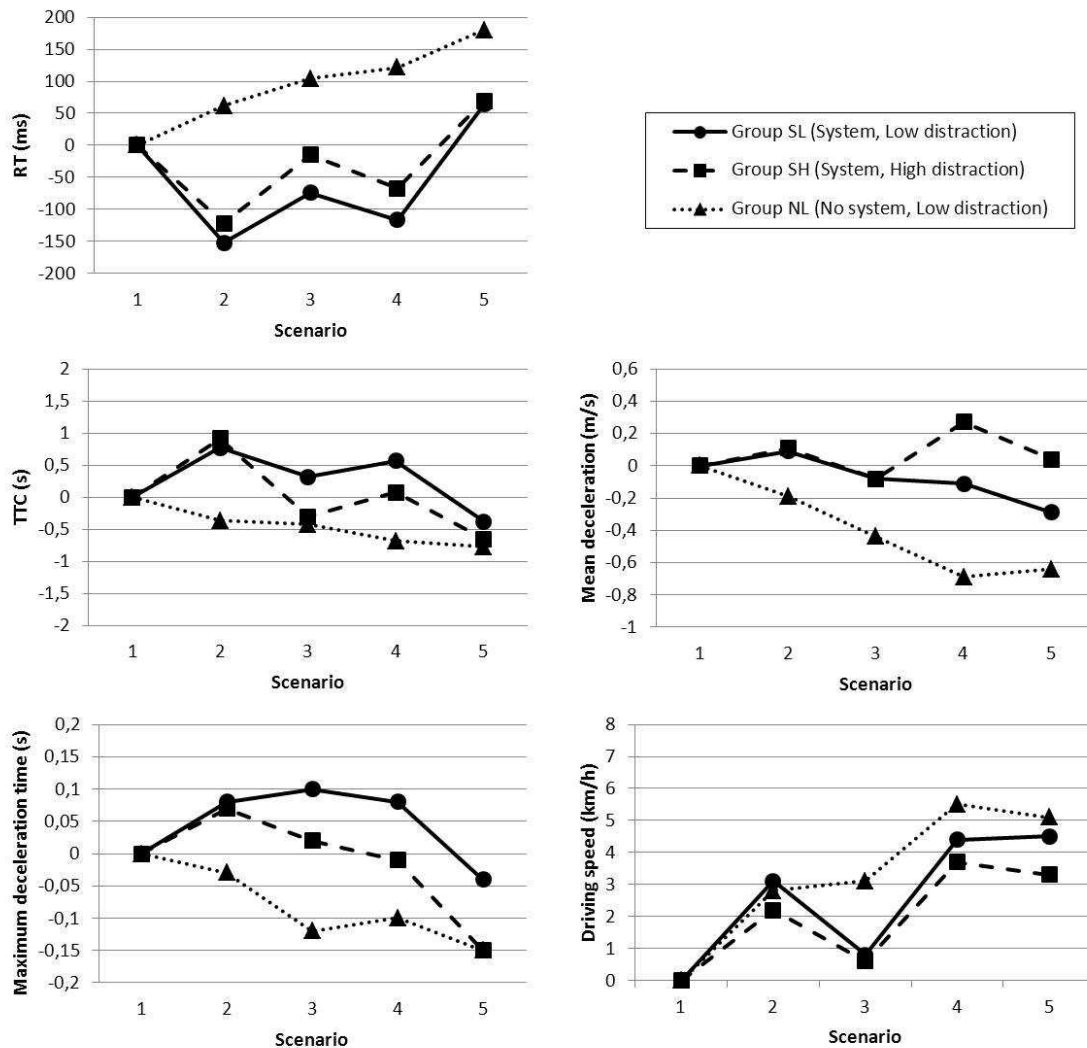


Figure 1. Mean brake RT, TTC, maximum deceleration time, mean deceleration, and driving speed (differences from the baseline) for the groups SL (System, Low distraction), SH (System, High distraction), and NL (No system, Low distraction) during the five scenarios.

3.2.1. Impact of introducing the system

The results obtained in this section compare drivers' performances between scenarios 1 and 2 and drivers' performances between the three groups in scenario 2.

Firstly, with the introduction of the system during scenario 2, the system group performing the low distraction task (group SL) braked faster than in scenario 1 ($Z = -3.059$, $p = 0.002$), increased the TTC ($Z = -2.903$, $p = 0.004$) and the maximum deceleration time ($Z = -2.824$, $p = 0.005$). The system group performing the high distraction task (group SH) also showed faster RT ($Z = -2.667$, $p = 0.008$) and longer TTC ($Z = -2.510$, $p = 0.012$). Although it seemed that they increased the time needed to achieve the maximum deceleration, this result was not significant. As expected, no significant differences regarding these variables were observed for the control group (group NL). The three groups significantly increased their driving speed between the first and second scenarios (group SL: Z

= -2.510, $p = 0.012$; group SH: $Z = -2.118$, $p = 0.034$; group NL: $Z = -3.059$, $p = 0.002$) indicating that the introduction of the system did not seem to affect the driving speed variable.

Secondly, when comparing performances of the three groups in scenario 2, significant group differences were observed in terms of brake RT ($H = 15.947$, $p < 0.001$) and TTC ($H = 13.410$, $p = 0.001$), a tendency was found in the maximum deceleration time ($H = 5.275$, $p < 0.072$), but no significant differences were found regarding the mean deceleration and driving speed variables. More specifically, the two system groups (groups SL and SH) differed from the control group (group NL) showing faster brake RT ($U = 7$, $p < 0.001$; $U = 22$, $p = 0.004$, respectively), longer TTC ($U = 13$, $p = 0.001$; $U = 22$, $p = 0.004$, respectively), and longer maximum deceleration time (group SL: $U = 37$, $p = 0.045$; a tendency was found for group SH: $U = 43$, $p = 0.094$). Groups SL and SH did not differ significantly in any variable.

3.2.2. Impact of introducing the distraction task according to its difficulty levels

In this part, drivers' performances during scenario 3 are compared to drivers' performances in scenarios 2 and 1 and the three groups were compared between each other in scenario 3.

In scenario 3 compared with scenario 2, the introduction of both low and high secondary tasks seemed to have a negative effect on performances of groups driving with the system. The results showed a significant increment of the brake RT (group SL: $Z = -2.589$, $p = 0.010$; group SH: $Z = -2.275$, $p = 0.023$) and a significant reduction of the TTC (group SL: $Z = -2.667$, $p = 0.008$; group SH: $Z = -2.746$, $p = 0.006$). The introduction of the low distraction task for the control group (group NL) only affected drivers' performances in terms of faster maximum deceleration time ($Z = -2.040$, $p = 0.041$). Although the two system groups reduced the driving speed when they were carrying out the distraction task, the difference between scenarios 2 and 3 was only significant for group SL ($Z = -2.197$, $p = 0.028$).

However, when comparing drivers' performances between scenario 3 and the baseline, it seemed that the system was able to improve drivers' performances for group SL. Specifically, the brake RT was faster ($Z = -2.275$, $p = 0.023$) and the TTC ($Z = -1.961$, $p = 0.050$) and the maximum deceleration time was longer ($Z = -2.353$, $p = 0.019$) for group SL. Performance of group SH came back to the baseline levels as no significant differences between the first and third scenarios were found for any variables studied for this group. However, group NL showed a significant increment of the brake RT ($Z = -2.040$, $p = 0.041$), a reduction of the maximum deceleration time ($Z = -2.903$, $p = 0.004$) and the mean deceleration ($Z = -2.040$, $p = 0.041$), and an increment of the driving speed ($Z = -2.197$, $p = 0.028$).

Finally, during scenario 3, the three groups differed significantly with regard to the brake RT ($H = 9.483$, $p = 0.009$) and the maximum deceleration time ($H = 14.686$, $p = 0.001$) and there was a tendency regarding the TTC variable ($H = 5.722$, $p = 0.057$). Concretely, group SL differed significantly from group NL in terms of faster brake RT ($U = 21$, $p = 0.003$), longer TTC ($U = 33$, $p = 0.024$), and longer maximum deceleration time ($U = 9$, $p < 0.001$). This group tended to show faster RT and longer TTC compared to group SH although these differences were only marginal ($U = 39$, $p = 0.060$; $U = 40$,

$p = 0.068$, respectively). Group SH showed longer maximum deceleration times compared to group NL ($U = 26$, $p = 0.008$).

3.2.3. Impact of removing the distraction task

These results analyse drivers' performances between scenarios 4 and 3 and also drivers' performances between the three groups in scenario 4. Firstly, when comparing drivers' performances between scenarios 4 and 3, only the driving speed variable increased significantly for the three groups (group SL: $Z = -2.589$, $p = 0.010$; group SH: $Z = -2.432$, $p = 0.015$; group NL: $Z = -2.589$, $p = 0.010$). In addition, group NL reduced the mean deceleration ($Z = -1.961$, $p = 0.050$). It seemed that after removing the secondary task, drivers' performances improved for the two system groups (group SL and SH) by faster brake RT and longer TTC; however, these differences did not reach statistical significance.

Secondly, drivers' performance among the three groups was different with regard to the variables of brake RT ($H = 16.474$, $p < 0.001$), TTC ($H = 8.335$, $p = 0.015$), maximum deceleration time ($H = 10.572$, $p = 0.005$), and mean deceleration ($H = 10.410$, $p = 0.005$). No significant differences were found regarding the driving speed. More specifically, groups SL and SH compared to group NL showed faster brake RT ($U = 11$, $p < 0.001$; $U = 15$, $p = 0.001$, respectively), longer TTC (significant between groups SL and NL: $U = 22$, $p = 0.004$; tendency between groups SH and NL: $U = 43$; $p = 0.094$), longer maximum deceleration time ($U = 24$, $p = 0.006$; $U = 25$, $p = 0.007$, respectively), and an increase of the mean deceleration ($U = 36$, $p = 0.038$; $U = 19$, $p = 0.002$, respectively). Groups SL and SH did not differ significantly.

3.2.4. Behavioural adaptation to the system

The results presented in this section contrast drivers' performances between scenarios 4 and 2 and between scenarios 4 and 1. Firstly, when comparing the behavioural adaptation to the system before and after the secondary task, all variables studied in this experiment remained stable for group SL. The performances for group SH deteriorated in terms of longer brake RT ($Z = -2.040$, $p = 0.041$) and shorter TTC ($Z = -2.667$, $p = 0.008$). Group NL experienced longer brake RT ($Z = -2.040$, $p = 0.041$), faster maximum deceleration time ($Z = -2.589$, $p = 0.010$), a reduction of the mean deceleration ($Z = -2.353$, $p = 0.019$), and an increase of the driving speed ($Z = -3.059$, $p = 0.002$).

Secondly, when comparing the adaptation to the system after driving with the system for 45 min in scenario 4 with the baseline, group SL still showed faster brake RT ($Z = -3.059$, $p = 0.002$) and longer TTC ($Z = -2.510$, $p = 0.012$). Group SH tended to reduce the brake RT ($Z = -1.883$, $p = 0.060$) while group NL significantly increased the brake RT ($Z = -2.510$, $p = 0.012$), significantly reduced the maximum deceleration time ($Z = -2.824$, $p = 0.005$), the mean deceleration ($Z = -2.903$, $p = 0.004$) and marginally the TTC ($Z = -1.883$, $p = 0.060$). Concerning the driving speed, a generalized increment

was observed in the three groups (group SL: $Z = -2.510$, $p = 0.012$; group SH: $Z = -2.667$, $p = 0.008$; group NL: $Z = -3.059$, $p = 0.002$).

3.2.5. Impact of driving with the system off

The following data compare drivers' performances between scenarios 5 and 4, between scenarios 5 and 1, and between the three groups in scenario 5. The transition between scenarios 4 and 5 for the two system groups was characterized by longer brake RT (group SL: $Z = -3.059$, $p = 0.002$; group SH: $Z = -2.510$, $p = 0.012$), shorter TTC (group SL: $Z = -3.059$, $p = 0.002$; group SH: $Z = -2.353$, $p = 0.019$), and faster maximum deceleration time (group SL: $Z = -2.510$, $p = 0.012$; group SH: $Z = -2.667$, $p = 0.008$). The control group (group NL) did not experience significant changes at this stage except for a significant increase of the brake RT ($Z = -2.040$, $p = 0.041$).

When comparing scenarios 5 and 1 (when no system was available for any group), drivers' performances for the two system groups were not significantly different except for an increment of the driving speed (group SL: $Z = -2.040$, $p = 0.041$; group SH: $Z = -2.040$, $p = 0.041$) and faster maximum deceleration time observed only in group SH ($Z = -2.275$, $p = 0.023$). The control group (group NL) changed significantly at the level of all the variables studied, showing longer brake RT ($Z = -3.059$, $p = 0.002$), shorter TTC ($Z = -2.746$, $p = 0.006$), shorter maximum deceleration time ($Z = -2.981$, $p = 0.003$), shorter mean deceleration ($Z = -2.589$, $p = 0.010$), and faster driving speed ($Z = -2.981$, $p = 0.003$).

Comparing the three groups' performances in this last scenario, no significant differences were found in any variable studied.

3.3. Analyse of the subjective measures

3.3.1. Task load index

In general, with the introduction of the secondary task in scenario 3 compared to scenario 2, the three groups scored higher in the variables of mental demand (group SL: $Z = -2.722$, $p = 0.006$; group SH: $Z = -3.082$, $p = 0.002$; group NL: $Z = -3.134$, $p = 0.002$), effort (group SL: $Z = -2.414$, $p = 0.016$; group SH: $Z = -2.626$, $p = 0.009$; group NL: $Z = -2.970$, $p = 0.003$), discouragement (group SL: $Z = -2.333$, $p = 0.020$; group SH: $Z = -2.850$, $p = 0.004$), irritation (group SL: $Z = -2.333$, $p = 0.020$; group SH: $Z = -2.911$, $p = 0.004$) and stress (group SH: $Z = -2.530$, $p = 0.011$), and they scored lower regarding the annoyance variable (group SL: $Z = -2.565$, $p = 0.010$; group NL: $Z = -2.333$, $p = 0.020$). Figure 2 illustrates the different difficulty levels of the secondary tasks estimated by the participants in terms of mental demand.

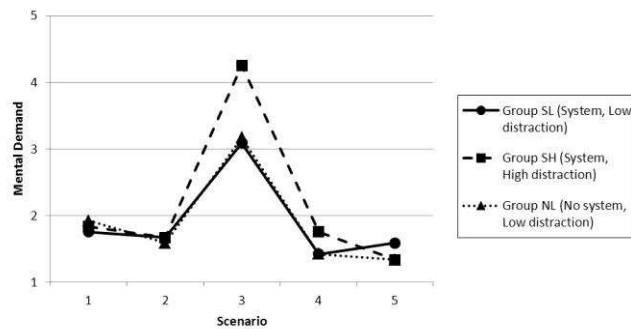


Figure 2. Subjective ratings on mental demand (1: low; 5: high) for groups SL (System, Low distraction), SH (System, High distraction), and NL (No system, Low distraction) during the five scenarios.

Comparing the three groups during scenario 3, significant differences were found regarding mental demand ($H = 8.014$, $p = 0.018$), discouragement ($H = 18.383$, $p < 0.001$), and irritation ($H = 15.611$, $p < 0.001$). Particularly, the highest scores were obtained for group SH (System, High distraction) which was significantly different from group SL (System, Low distraction) in terms of mental demand ($U = 31$; $p = 0.014$) and discouragement ($U = 27$; $p = 0.007$) and from group NL (No system, Low distraction) concerning mental demand ($U = 31.5$; $p = 0.015$), discouragement ($U = 9$; $p < 0.001$), and irritation variables ($U = 11$; $p < 0.001$). Group SL scored higher than group NL in discouragement ($U = 33$; $p = 0.011$) and irritation ($U = 32$; $p = 0.009$).

3.3.2. Acceptance of the system

The mean score for the satisfying scale was 0.16 (-2 to +2) and 0.68 for the usefulness scale. The Mann-Whitney test did not reveal any significant differences between the two groups driving with the system.

3.3.3. Trust in the system

The mean trust in the system estimated by group SL was 61.3% and 55% for group SH. No significant differences between these two groups were obtained.

4. Discussion

The two objectives of this study were to examine the immediate and short-term behavioural adaptation to an FCWS reliable at 75% and to study the impact of the two difficulty levels of a secondary task on the effectiveness of and on the behavioural adaptation to the system.

It is interesting to start describing the performances of the control group which showed a particular profile of response throughout the experiment compared to both system groups. Specifically, when looking at the transition from one scenario to another, the control group's performances remained relatively stable for most of the variables. However, when looking at the complete sequence of the five scenarios, a progressive and directional modification of the driving behaviour was observed, that resulted in large differences between the baseline and the last scenario. Thus, compared to the baseline, the control group exhibited slower braking reaction times, shorter headways, faster depressions of the brake pedal, smaller decelerations, and faster driving speed in the last scenario. This progressive deterioration of the performance could be interpreted as a progressive adaptation to the driving task which remains homogeneous throughout the experiment. A similar effect was detected by Maltz and Shinar (2007) who found that the control group driving without the system increased the time spent in danger zones (<0.5 s headway). The authors interpreted this result as a higher familiarity with the simulation.

Concerning the behavioural adaptation to the system, the results showed that during the learning phase, the introduction of the system induced positive changes in drivers' performances. Specifically, compared to the first scenario, drivers tended to react faster to the lead vehicle decelerations and they also showed safer behaviours maintaining longer headways and braking more progressively when they were driving with the system for the first time. As already demonstrated (Abe & Richardson, 2006; Ben-Yaacov et al., 2002; Ho & Spence, 2009; Lee et al., 2002), these results are further proof of the benefits of this type of system on drivers' performances under simple task conditions.

With regard to the effect of the secondary task, the results showed that performing both slightly and highly demanding secondary tasks deteriorated the performances for the two system groups in terms of slower reaction times and shorter safety margins. However, the extent of this deterioration depends on the cognitive load of the secondary task. Indeed, the negative effect of the low demanding task was partially compensated by the system and participants still showed a benefit from the system compared to the baseline (without the system). This benefit resulted in faster reaction times, safer headways, and more progressive decelerations. However with the high demanding secondary task, the positive effects obtained when driving with the system for the first time disappeared and drivers' performances returned to the baseline level. Subjective data also revealed a different impact between the two difficulty levels. Indeed, participants carrying out the high demanding secondary task reported higher mental demands and were more discouraged than the participants carrying out the low demanding secondary task. These results are in accordance with our hypothesis that the warning signal needs some attentional resources to be processed. Therefore, the system could not be as effective as expected if drivers are distracted by highly demanding secondary tasks.

Furthermore, still regarding the effectiveness of the system when drivers are distracted, it is interesting to compare the effect of the low demanding secondary task between the control group and the system group. This low demanding secondary task was perceived as equally demanding for the two groups. Regarding the objective data, both reaction times and safety margins were clearly deteriorated for the system group by this secondary task. Concerning the control group, as already mentioned, it showed a progressive deterioration of the performance throughout the experiment. Therefore, it is not possible to conclude on the impact of the secondary task on the drivers' performances in this group. However,

only the speed of the system group was reduced by the secondary task compared to the previous scenario without distraction. It has been shown that reducing the driving speed could be a compensatory strategy to reduce the mental effort of a complex driving situation (see for example, Fuller, 2005; Jamson & Merat, 2005). Consequently, this result suggests that driving with the secondary task and the system would engage more mental effort than driving with the secondary task but without the system. Overall, these results represent another element supporting our hypothesis that the system could need some attentional resources to be processed.

Once the secondary task was over, drivers' performances with the FCWS tended to improve slightly and participants adapted their performance to the less demanding situation (only driving) by increasing the driving speed. However, it seems that the secondary tasks experienced during the previous scenario affected the behavioural adaptation to the system differently, depending on its difficulty level. Indeed, the group having performed the low demanding secondary task just before recovered the performance level obtained when the system was introduced for the first time. Accordingly, the comparison with the baseline resulted in an improvement of the drivers' performances in terms of faster reaction times and safer headways. Regarding the group having performed the high demanding secondary task, the effectiveness of the system was less evident. Specifically, this group did not recover the performance level obtained when the system was introduced for the first time and it returned to the performance level obtained in the baseline. These results strongly suggest that, beyond this immediate negative effect, performing a highly demanding secondary task can also impact the integration phase by decreasing the benefit of the system.

Finally, in this experiment, no transfer effects after the integration phase were observed when the system was no longer available. Both system groups showed riskier behaviours compared to the previous scenario and drivers' performances were more similar to the control group. Nevertheless, it should be mentioned that, in general, drivers' performances of the two system groups returned to baseline levels indicating that there was not a negative behavioural adaptation. The absence of transfer effects in this experiment contrasted with the results obtained by Ben-Yaacov et al. (2002) in an on-road experiment. These authors observed that the participants were able to maintain safer behaviours after a brief exposure to the system and even six months later. It could be possible that the lower risk perception experienced in a driving simulator could explain why no transfer effects were found in our experiment contrary to Ben-Yacoov et al.'s experiment.

A possible limitation of this study was the high number of repetitions of the braking trials and therefore of the warnings in the system groups, in order for the system to become familiar for the drivers. It could be possible that these warnings produce a general increment of the vigilance throughout the scenario and not only for the particular braking event. On the contrary, driving without the system could result in a very monotonous task for the control group which could explain its results pattern. Further studies with fewer exposures to the collisions but also longitudinal studies in more ecological contexts would be necessary to investigate how drivers adapt their behaviour to the system during the learning phase, and also the effects of driving with and without the system after the integration phase. To summarise, results of this experiment showed that both the adaptation to the system and the system effectiveness were dependent on drivers' cognitive load. Drivers adapted their behaviour positively when driving with the system during the learning phase. In addition, in the case of

distraction, our results revealed that the system was only effective when the secondary task was less demanding. These results are consistent with the hypothesis that the system needs some attentional resources to be processed. Moreover, the fact of having added the distraction task seemed to have disrupted the integration phase when the cognitive demands were high and not low. These results showed that even if the system induced safer driving behaviours during the learning phase, the high demanding task could disrupt the integration process of the system. FCWS are specially designed to assist distracted drivers. However, in light of these results, caution should also be taken when driving with new assistance systems and engaging in highly demanding secondary tasks.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement no.238833/ ADAPTATION project. www.adaptation-itn.eu. The authors would like to thank Joceline Rogé for her help in the design of a program for the data analysis, Stéphane Caro for his help in the calculation of the timing of the warning system, and Myriam Hugot for advice on statistics.

References

- Abe, G., & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics*, 37(5), 577-586.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A(1), 5-28.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., & Shinar, D. (2002). Effects of an In-Vehicle Collision Avoidance Warning System on Short- and Long-Term Driving Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 335-342.
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., & Fort, A. (2012). An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. *Brain Research*, 1470, 69-79.
- Bueno, M., Fort, A., Francois, M., Ndiaye, D., Deleurence, P., & Fabrigoule, C. (2013). Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective. *Neuroscience Letters*, 541, 219-223.
- Comte, S. L. (2000). New systems: new behaviour? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 3(2), 95-111.
- Edworthy, J., Loxley, S., & Dennis, I. (1991). Improving auditory warning design: relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 33, 205-232.
- Fort, A., Collette, B., Bueno, M., Deleurence, P., & Bonnard, A. (2013). Impact of totally and partially predictive alert in distracted and undistracted subjects: An event related potential study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 578-586.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., Trbovich, P. L., & Eizenman, M. (2007). An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 372-379.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. H. a. N. Meshkati (Ed.), *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press.
- Ho, C., & Spence, C. (2009). Using peripersonal warning signals to orient a driver's gaze. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(4), 539-556.
- ISO 15623. (2002). Transport information and control systems - Forward vehicle collision warning systems - Performance requirements and test procedures.

- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 79-96.
- Kramer, A. F., Cassavaugh, N., Horrey, W. J., Becic, E., & Mayhugh, J. L. (2007). Influence of Age and Proximity Warning Devices on Collision Avoidance in Simulated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 935-949.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 314-334.
- Maltz, M., & Shinar, D. (2007). Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid distracted drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(4), 345-357.
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69, 220-232.
- Mohebbi, R., Gray, R., & Tan, H. Z. (2009). Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(1), 102-110.
- Reitan, R. (1958). Validity of the trail making test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and Motor Skills*, 8, 271-276.
- Rudin-Brown, C. M., & Noy, Y. I. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record*, 1803, 30-37.
- Saad, F., Hjälm Dahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects AIDE Project, Deliverable D1.2.1. Brussels: Information Society Technologies.
- Van der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(1), 1-10.
- Wechsler, D. (1981). *Wechsler Adult and Intelligence scale Revised*. New-York: Psychological Corporation.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Ed.), *Attention and performance* (pp. 239-257). Hillsdale: NJ Erlbaum.
- Wickens, C. D., & Dixon, S. R. (2007). The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(3), 201-212.

5. DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse a été centré sur l'analyse de l'impact d'un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur en conduite automobile simulée.

L'ensemble des travaux expérimentaux menés au cours de cette thèse nous a permis d'apporter des éléments de réponse aux questions qui ont été soulevées en introduction. Plus précisément, nous avons formulé quatre objectifs spécifiques :

1. Déterminer l'impact d'un signal avertisseur associé à un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information à partir de mesures électrophysiologiques ;
2. Analyser l'efficacité d'un tel système en fonction de sa fiabilité ;
3. Analyser l'efficacité d'un tel système en fonction de l'état attentionnel des conducteurs ;
4. Examiner l'adaptation comportementale au système au cours du temps.

Dans cette dernière partie de la thèse, nous allons rappeler les principaux résultats de ce travail en fonction de chacun des objectifs, et nous les discuterons en relation avec les résultats de la littérature.

5.1. L'impact du signal avertisseur sur le traitement de l'information

Dans nos deux premières expériences, nous avons examiné, en utilisant pour la première fois l'approche électrophysiologique, le rôle du signal avertisseur dans le traitement d'un stimulus visuel pertinent dans le contexte de la conduite : l'allumage du feu stop du véhicule précédent. L'enregistrement de l'activité électrique cérébrale nous a permis de dissocier et d'analyser les différentes étapes impliquées dans le traitement de la cible visuelle suite au déclenchement ou non

d'un signal avertisseur. Plus précisément, nous avons centré nos analyses autour des processus anticipatoires (VCN), sensoriels (N1) et de plus haut niveau cognitif (N2 et P3).

Nos résultats ont montré que le signal avertisseur était associé à une VCN, mettant en avant son rôle d'anticipation de la cible et de la préparation à la réponse. De plus, nous avons trouvé que la présence du signal avertisseur modulait le traitement de plus haut niveau cognitif à travers une réduction de l'amplitude de la N2 et de la latence de la P3. Ce résultat pourrait suggérer une intervention du signal dans des processus de contrôle cognitif (e.g. supervision, contrôle de la stratégie, processus d'inhibition) (Folstein & Van Petten, 2008), ainsi qu'une amélioration de l'attente temporelle (Correa et al., 2006) et une accélération du traitement de la cible. Ces résultats sont consistants avec les données de la littérature montrant que le signal avertisseur agit au niveau de la sélection de la réponse (Correa et al., 2006; Hackley & Valle-Inclán, 2003; Rudell & Hu, 2001).

En ce qui concerne les étapes plus précoces du traitement de l'information (N1), nous n'avons pas mis en évidence un effet du signal avertisseur ce qui indique que, dans nos expériences, ce signal ne semble pas faciliter le traitement sensoriel de la cible. Néanmoins, nous avons remarqué que dans nos conditions expérimentales, l'amplitude maximale de la N1 apparaissait tardivement (plus de 200 ms) et présentait une propagation de l'activité électrique vers des régions qui sont modulées par la N2. Si il est possible de clairement dissocier les deux composantes sur la base de leur distribution spatiale et de la latence de leur pic, il est difficile de déterminer comment une modulation de l'une peut impacter l'autre. Ainsi à partir de ces résultats, l'hypothèse d'une implication du signal au niveau sensoriel ne peut pas être complètement exclue, car il est difficile de savoir si l'effet trouvé au niveau de la N2 a été spécifiquement dû à une modulation de cette composante ou bien s'il est partiellement dû à une modulation de la N1. Toutefois, selon la littérature, l'implication du signal avertisseur au niveau du traitement sensoriel a été moins mise en évidence qu'à un niveau plus cognitif et pourrait dépendre du type de tâche à réaliser (Correa et al., 2006).

5.2. L'impact de la fiabilité du système

Sachant que les systèmes anticollision actuellement sur le marché ne sont pas complètement fiables, le deuxième objectif de cette thèse visait à examiner dans quelle mesure le niveau de fiabilité d'un système peut affecter le traitement de l'information et le comportement des conducteurs. Nous avons utilisé dans nos expériences un niveau de fiabilité à 100% d'une part, et un niveau de fiabilité situé entre 70 et 76% d'autre part, critère à partir duquel un système pourrait être considéré comme étant efficace (Wickens & Dixon, 2007). Le pourcentage d'erreurs du système était réparti à proportions égales entre des fausses alarmes et des défauts de détection.

Au niveau neural, nous avons observé que lorsque le signal avertisseur n'était pas le seul prédicteur de la présence de la cible, comme dans le cas de notre première expérience, seul le système entièrement fiable était efficace et entraînait une facilitation du traitement cognitif de la cible. Cependant, si le signal devenait le meilleur indicateur de la présence de la cible, même si il n'était pas complètement fiable, comme dans le cas de notre deuxième expérience, il avait un effet positif au niveau des processus anticipatoires et du traitement de plus haut niveau cognitif.

Au niveau comportemental, nos résultats ont montré que les systèmes anticollision imparfaits étaient utiles dans la détection de possibles collisions. Nous avons trouvé un effet positif à la fois dans les conditions de simulation simplifiées comme dans la condition de simulation plus réaliste. L'efficacité de systèmes anticollision imparfaits a été montrée également par d'autres études réalisées sur simulateurs de conduite (Maltz & Shinar, 2004) ou dans des situations de conduite réelles (Ben-Yaacov et al., 2002). En effet, la présence de fausses alarmes et de défauts de détection de potentielles collisions n'amointrit pas nécessairement l'efficacité de ces systèmes. De plus, certains auteurs soulignent que ces erreurs pourraient même avoir un effet positif dans le comportement des conducteurs, dans la mesure où ils pourraient empêcher les conducteurs d'accorder un excès de confiance au système (Parasuraman et al., 1997). Néanmoins, un pourcentage trop élevé d'erreurs du système peut être critique dans l'acceptation et l'efficacité du système (Abe et al., 2002; Lerner et al., 1996).

La psychologie de l'apprentissage pourrait permettre de comprendre pourquoi les systèmes non fiables peuvent être efficaces. L'association entre le signal avertisseur (stimulus 1) et le risque (stimulus 2) est produite dans des contextes très différents (par exemple, trafic dense ou faible, conditions météorologiques bonnes ou mauvaises, tâches secondaires ou non, etc.). En outre, les conducteurs apprennent que la relation causale entre les deux stimuli n'est pas parfaite. En effet, comme nous l'avons vu dans l'introduction, le système parfait n'existe pas. La présence de fausses alarmes et de défauts de détection produit un renforcement intermittent du signal avertisseur et, par conséquent, une plus grande résistance à l'extinction (Mackintosh, 1974).

5.3. Impact de l'état attentionnel du conducteur

La distraction est le principal facteur contributif identifié dans les collisions par l'arrière. De fait, il est attendu que les systèmes anticollision aident particulièrement les conducteurs distraits à rediriger l'attention vers la route si nécessaire et à réagir plus rapidement. Pour mieux comprendre comment la distraction interfère avec le comportement des conducteurs dans des situations potentielles de collision, l'impact du système devrait être analysé dans des conditions de distraction comparées à des situations contrôles sans distraction.

Dans notre travail, l'efficacité d'un système anticollision selon l'état attentionnel du conducteur, distrait ou non, a été examinée par le biais d'une tâche cognitive, sur le traitement de l'information et le comportement des conducteurs. Bien que moins étudiée que les distractions visuelles ou visuo-motrices, il a été montré, que ce type de distraction peut également avoir des conséquences négatives pour la sécurité (Collet et al., 2009; Jamson et al., 2004; Lambale et al., 1999).

Au niveau neural, nos résultats ont montré un effet robuste de la distraction. En particulier, lorsque les participants étaient distraits par la tâche cognitive, nos résultats indiquent une moindre capacité d'anticipation ainsi qu'une détérioration du traitement de la cible aux différentes étapes du traitement de l'information. Nous avons observé dans notre première expérience que, bien que le système avertisseur ait réduit partiellement l'effet négatif de la tâche secondaire, il n'avait pas été capable de l'éliminer complètement. Avec notre deuxième étude, dans laquelle le signal avertisseur était le meilleur prédicteur de la cible, nous avons observé que, contrairement à nos attentes, le signal avertisseur n'avait pas non plus été capable de compenser complètement l'effet de la distraction. L'effet négatif d'une tâche secondaire dans le cadre de la conduite automobile avait aussi été mis en évidence à travers d'autres études électrophysiologiques mais seulement au niveau du traitement cognitif de plus haut niveau (Bruyas et al., 2006; Raabe et al., 2005; Rakauskas et al., 2005; Strayer & Drews, 2007).

Au niveau comportemental, dans la première expérience, les résultats ont également montré un fort effet négatif de la distraction que le système n'était pas capable de compenser. Dans la deuxième expérience, dans laquelle le signal est le meilleur prédicteur de la cible, cet effet négatif de la distraction n'a pas été compensé. Dans la troisième expérience, l'effet de la distraction n'a été délétère sur l'efficacité du signal avertisseur que lorsque la tâche secondaire était de haute difficulté cognitive et non dans le cas où elle était de faible difficulté cognitive.

Les résultats inattendus, obtenus à la fois au niveau neural et au niveau comportemental, nous ont amené à nous questionner sur les facteurs qui influencent l'efficacité du système anticollision en cas de distraction : en particulier, dans quelle mesure elle dépend du type du signal avertisseur et/ou du type de tâche secondaire.

Selon la littérature, les signaux avertisseurs de type multimodal (par exemple, signal visuo-auditif) pourraient avoir un effet plus puissant que les signaux unimodaux (Campbell et al., 2007; Ho et al., 2007; Ho & Spence, 2009), particulièrement dans le cas de distraction (Kramer et al., 2007; Spence & Santangelo, 2009). Ce résultat a été trouvé tant dans des études sur simulateur de conduite (Ho et al., 2007) que dans des études hors du contexte de la conduite utilisant des potentiels évoqués (Santangelo, Van der Lubbe, Olivetti Belardinelli, & Postma, 2008).

Dans nos expériences, nous avons choisi de tester un signal avertisseur unimodal auditif qui permet de générer un sentiment d'urgence fort. L'utilisation d'un signal visuel dans nos deux premières études aurait pu engendrer des saccades oculaires qui auraient contaminé le signal électroencéphalographique.

Selon le modèle cognitif de ressources multiples de Wickens (1980), deux tâches concurrentes seront réalisées de façon plus efficaces si elles ne s'appuient pas sur le même niveau d'une dimension donnée du modèle. Ce modèle prédit une plus grande interférence si deux tâches concurrentes nécessitent la même étape de traitement perceptif ou cognitif (dimension des étapes du traitement) et si, de plus, elles utilisent la même modalité (dimension des modalités). Dans nos expériences nous avons utilisé un signal avertisseur de type auditif, impliquant donc un encodage auditif et, une tâche secondaire cognitive, impliquant un encodage auditif et un traitement cognitif. En accord avec le modèle de Wickens, ces conditions pourraient avoir contribué à diminuer l'efficacité du signal avertisseur. D'autres résultats de la littérature sont en accord avec ce modèle et montrent que les signaux auditifs et visuo-auditifs semblent être efficaces pour aider les conducteurs à détecter les collisions potentielles lorsqu'ils sont distraits par une tâche secondaire visuelle (Ho & Spence, 2009; Kramer et al., 2007; Lee et al., 2002). De même, l'étude de Mohebbi et al. (2009) montre que, lors d'une distraction audio-cognitive (maintenir une conversation plus ou moins compliquée), un signal avertisseur de type auditif est moins efficace qu'un signal de type tactile.

Enfin, les résultats des deux premières expériences concernant l'incapacité du signal à compenser l'effet négatif de la distraction avaient suggéré que le signal avertisseur pourrait nécessiter des ressources attentionnelles pour être traité. Il serait donc moins efficace dans des conditions qui requièrent un haut niveau d'investissement de ressources (comme dans notre tâche secondaire cognitive). Nous avons testé cette hypothèse dans la troisième expérimentation menée dans un contexte de conduite plus réaliste. De façon plus précise, nous avons évalué l'efficacité du signal avertisseur en fonction de deux niveaux de difficulté de la tâche secondaire de distraction cognitive. Nous savons à partir des premiers modèles de capacité que notre attention est limitée (Broadbent, 1958; Kahneman, 1973). Certains modèles (Baddeley & Hitch, 1974; Norman & Shallice, 1986) ont postulé l'existence d'un processeur central qui a une fonction de contrôle et de coordination des ressources attentionnelles. Ainsi, cette composante interviendrait lors des situations plus coûteuses au niveau des ressources attentionnelles engagées comme dans des situations non automatisées, nouvelles ou plus complexes. Cependant, lorsque la réalisation d'une ou plusieurs tâches nécessitent plus de ressources attentionnelles que celles qui sont disponibles, une détérioration de la performance pourrait être observée.

En accord avec cette hypothèse, nos résultats ont montré une moindre efficacité des systèmes lorsque la tâche cognitive était plus coûteuse en ressources. Nos résultats sont consistants avec l'étude de Mohebbi et al. (2009) qui est, à notre connaissance, la seule étude qui a aussi évalué l'efficacité d'un système anticollision en fonction de différents niveaux de difficulté d'une tâche cognitive. Bien que l'intérêt principal des auteurs ait été centré sur l'efficacité de deux modalités différentes du signal avertisseur (tactile et auditif), leurs résultats ont montré un plus grand bénéfice du système (tactile) lors de la réalisation d'une tâche moins coûteuse en ressources attentionnelles. D'autres travaux, hors du contexte des systèmes d'aide à la conduite, ont montré dans des études réalisées en simulateur de conduite (Jamson & Merat, 2005) ou sur piste (Harbluk et al., 2007) que la performance du conducteur est négativement affectée lorsque le niveau de difficulté des tâches secondaires cognitives augmente.

Il est intéressant de souligner qu'en condition de distraction les conducteurs ont considérablement réduit leur vitesse. Ceci pourrait être interprété selon la théorie de Fuller (2005) comme une tentative de réduction de l'effort mental nécessaire pour réaliser en même temps la tâche de conduite et la tâche secondaire.

5.4. Adaptation comportementale au système

Comme nous l'avons vu, l'adaptation aux systèmes d'aide à la conduite peut changer au cours du temps (Saad et al., 2004), lors des premières utilisations du système (phase d'apprentissage) comme après une plus grande expérience avec le système (phase d'intégration). De plus, il est aussi important de considérer les possibles transferts négatifs (vulnérabilité du conducteur) ou positifs qui peuvent apparaître lors d'une conduite sans le système suivant une utilisation prolongée. Dans ce cadre, notre dernier objectif vise à examiner l'adaptation comportementale à ces systèmes dans des contextes plus proches de la conduite réelle. Plus précisément, il s'agit d'analyser comment les conducteurs s'adaptent au système pendant les premiers usages et après une courte période de temps, et comment ils s'adaptent lorsque le système est inactif après cette courte période d'adaptation au système.

Concernant la phase d'apprentissage, nos résultats ont montré que les conducteurs adaptent positivement leur comportement au système. Nous pouvons extraire ce résultat de nos deux premières expériences réalisées dans des conditions de conduite très simplifiées, bien que l'étude de l'adaptation immédiate au système n'ait pas été posée comme objectif. De même, la plupart des études réalisées après une courte exposition au système montrent des effets positifs (Abe & Richardson, 2006; Lee et al., 2002; Mohebbi et al., 2009). Cependant, ces études ainsi que nos deux premières expériences avaient utilisé la technique du contrebalancement des périodes avec et sans système. Ainsi, l'information sur l'effet de l'introduction du système sur le comportement du conducteur n'avait pas été directement mesurée.

Dans la troisième expérience, dans des conditions plus réalistes et sans contrebalancement des périodes, nous avons de nouveau pu observer une adaptation très rapide lors de la phase d'apprentissage. Concernant la phase d'intégration, nous avons également observé des effets positifs. Lorsque la distraction est introduite, la distraction difficile annule l'effet positif du système alors que la distraction facile diminue cet effet. Lorsque la distraction est supprimée, les conducteurs qui ont réalisé précédemment une tâche de distraction facile retrouvent les effets positifs du système mais, étonnamment, le système reste moins efficace dans le cas où ils ont réalisé précédemment une tâche de distraction difficile. Ainsi, nos résultats soulignent que le processus d'intégration du système peut être affecté si les conducteurs sont distraits par des tâches secondaires coûteuses en ressources attentionnelles. Les distractions au volant étant très fréquentes, nos résultats suggèrent que

l'intégration du système dans des situations réelles de conduite puisse être affectée si le conducteur s'engage dans des tâches secondaires cognitivement difficiles.

Enfin, nos résultats ne montrent pas d'effets de transfert positif après la phase d'intégration lorsque le système était inactif, contrairement à l'étude réalisée sur route par Ben-Yaacov et al. (2002). Dans cette étude, des effets de transfert étaient observés après une courte exposition au système et même six mois plus tard. Il est possible que la notion subjective de risque soit moins élevée dans les simulateurs de conduite que sur route réelle, ce qui pourrait expliquer les différences entre ces deux études. Cependant, bien que les effets positifs du système dans notre étude disparaissent, nous n'avons pas observé d'adaptation comportementale négative.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre d'un projet Européen Marie Curie, ADAPTATION, visant à analyser l'impact de différents systèmes d'aide à la conduite sur le comportement du conducteur. Nous avons voulu avec cette thèse apporter de nouvelles connaissances sur le traitement de l'information et l'adaptation associés à un système particulier : le système d'alerte anticollision.

L'originalité de ce travail est double. D'une part, nous avons utilisé deux approches expérimentales complémentaires : une approche électrophysiologique et une approche comportementale. En particulier, l'enregistrement de l'activité électrique cérébrale a constitué l'un des principaux apports de cette thèse à l'étude des systèmes anticollision. Cela nous a permis d'analyser plus en profondeur l'impact d'un signal avertisseur sur le traitement de l'information et de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents aux changements comportementaux. Ainsi, nous avons conclu que le signal avertisseur agit au niveau de l'anticipation et de la préparation à la réponse et au niveau cognitif. Malgré les limitations de cette technique, les études électroencéphalographiques présentent un atout dans l'analyse de l'efficacité des systèmes anticollision.

D'autre part, la démarche suivie dans la construction de nos expériences nous a permis d'examiner tout d'abord les effets des systèmes dans des contextes très contrôlés mais très simplifiés, et d'utiliser par la suite un contexte de conduite plus réaliste. Cependant, les conditions expérimentales de nos travaux sont encore loin des conditions de conduite réelles. L'une des principales limites de nos expériences est la faible notion subjective de risque dans les environnements virtuels, par rapport à des conditions de conduite sur route réelle. De plus, le grand nombre de répétitions des événements de freinage de nos expériences peut en diminuer la validité écologique. Cette manipulation a été une condition nécessaire dans nos expériences électrophysiologiques afin d'obtenir un rapport signal sur

bruit acceptable pour l'estimation des potentiels évoqués. Dans notre dernière expérience réalisée dans un simulateur plus réaliste, la quantité des stimulations a été fortement réduite par rapport aux premières expériences. Cependant, un nombre non négligeable d'événements a été nécessaire afin d'analyser les effets de l'adaptation au système. Ceci pourrait donc avoir contribué à réduire la sensation de risque, qui reste un facteur fondamental dans des situations potentielles de collision. En effet, la probabilité d'avoir une collision par l'arrière dans la vie réelle est relativement faible. Ces questions gagneraient donc à être approfondies dans des conditions de conduite réelle sur piste ou sur route.

L'efficacité du système anticollision a été mesurée en faisant varier deux facteurs : la fiabilité du système et l'état attentionnel du conducteur. Par ailleurs nous avons étudié l'adaptation comportementale au système.

Concernant l'impact de la fiabilité du système nous avons confirmé que les systèmes anticollision ne nécessitent pas d'être complètement fiables pour être efficaces. Cependant, un aspect qui resterait à étudier dans nos travaux concerne l'effet immédiat ou global des erreurs du système sur le comportement des conducteurs. En effet, bien que les systèmes imparfaits puissent être efficaces de façon globale, l'effet ponctuel d'une fausse alarme ou d'un défaut de détection peut réduire l'acceptation du système par le conducteur et avoir un impact critique pour la sécurité. Par exemple, les fausses alarmes semblent induire des réponses de décélération qui ne sont pas nécessaires (Maltz & Shinar, 2004). Ceci, pourrait ne pas avoir de graves conséquences si le trafic est faible, en revanche, lors de conditions de circulation dense, cela pourrait générer des réactions de freinage en chaîne (Cummins et al., 2007). Les défauts de détections, pour leur part, pourraient entraîner une augmentation des temps de réaction aux événements critiques, ces temps de réaction pouvant même être plus longs qu'en l'absence de système dans le véhicule (Abe et al., 2002).

La question de la distraction nous a accompagnés tout au long de ce travail de thèse. Notre premier résultat, sur l'incapacité du signal avertisseur à compenser l'effet négatif de la distraction, nous a amenés à nous interroger plus en détail sur cet effet inattendu. Pour essayer de comprendre ce résultat, nous avons proposé deux hypothèses différentes. Notre première hypothèse concernant la présence d'un meilleur prédicteur de la cible a été testée dans la deuxième expérience mais elle ne suffisait pas à expliquer l'inefficacité du signal avertisseur en condition de distraction. Par la suite, nous avons testé et confirmé avec les résultats de notre troisième expérience notre deuxième hypothèse stipulant que le traitement du signal avertisseur n'est pas une tâche automatisée et nécessite des ressources attentionnelles pour être efficace, ressources qui peuvent ne pas être disponibles en cas de tâche secondaire. Plus la tâche est coûteuse en ressources attentionnelles moins le système est efficace.

Concernant l'adaptation comportementale, nous avons montré des effets d'apprentissage quasi-immédiats lorsque le système est introduit. La phase d'intégration a été étudiée en situation de distraction. Dans ce cas, l'intégration est perturbée lorsque la distraction est coûteuse en ressources

attentionnelles et beaucoup moins lorsque la distraction demande moins de ressources. Enfin lorsque le système est inactif, nous n'avons pas observé de transfert ni positif ni négatif.

Tous ces résultats et leurs interprétations ouvrent de nombreuses pistes de recherche pour aller plus loin dans l'étude comportementale et électrophysiologique des systèmes anticollision.

Comme nous l'avons déjà suggéré, des études réalisées dans des conditions de conduite plus réalistes, que ce soit sur piste ou sur route réelle, pourraient apporter des réponses à certaines questions que nous avons soulevées. En particulier, il serait important de comprendre l'impact du risque perçu sur le comportement du conducteur dans l'utilisation d'un système anticollision.

Concernant l'effet de la distraction, il serait intéressant d'analyser l'impact des différents niveaux de difficulté des tâches secondaires à partir d'une approche électroencéphalographique. De plus, il serait également intéressant d'examiner l'impact sur l'efficacité du système d'autres types de tâches secondaires cognitives (par exemple, plus naturelles comme l'écoute de livres audio) ainsi que d'autres tâches de modalités différentes.

Dans nos études nous avons manipulé le niveau de charge mentale en augmentant uniquement la difficulté de la tâche secondaire. Mais le niveau global de charge mentale de la situation pourrait aussi être manipulé en complexifiant la tâche de conduite ou en créant des situations stressantes, pour voir dans quelle mesure nous observerions des résultats comparables.

Par ailleurs, nous avons étudié la première phase de l'apprentissage du système en condition sans distraction. Il serait intéressant d'examiner comment cet apprentissage serait impacté par différents types et niveaux de distraction.

Concernant l'adaptation, des études longitudinales et en condition de conduite réelle sur des périodes de plusieurs mois sont nécessaires afin de mieux comprendre comment les conducteurs s'adaptent à ces systèmes à plus long terme.

Enfin, dans ce travail de thèse nous avons étudié seulement deux des nombreux facteurs qui peuvent influencer l'efficacité du système : la fiabilité du système et l'état attentionnel du conducteur. Cependant, d'autres facteurs peuvent aussi jouer un rôle sur cette efficacité. D'une part, comme nous l'avons mentionné dans le cadre théorique, certains aspects relatifs au design du système comme le moment de déclenchement de l'alerte ou la modalité de l'alerte sont des éléments critiques à prendre en considération. Mais même le « meilleur » des systèmes en termes de design pourrait ne pas être approprié pour certains conducteurs. Ici nous avons montré que l'efficacité du système peut varier en fonction de l'état attentionnel du conducteur. Sachant que les ressources attentionnelles diminuent avec l'âge et encore plus dans beaucoup de pathologies du système nerveux, il serait intéressant d'étudier comment ces populations peuvent s'adapter au système d'alerte anticollision. Par ailleurs d'autres facteurs liés au conducteur pourraient également être des facteurs modulateurs de l'adaptation au système anticollision comme le style de conduite, ou l'expérience des conducteurs.

Outre ces perspectives de recherche, nos résultats nous permettent également de proposer quelques recommandations qui pourraient être utiles aux concepteurs et aux utilisateurs de ce type de systèmes.

Selon nos résultats, le traitement du signal avertisseur n'est pas automatisé et nécessite des ressources attentionnelles pour être efficace. En conséquence, une sensibilisation auprès des usagers pourrait être faite afin de les avertir des précautions nécessaires lors des phases d'introduction et d'intégration des systèmes. Notamment, il est important de souligner que la réalisation de tâches secondaires difficiles au cours de ces périodes peut être préjudiciable. Par ailleurs, il serait intéressant d'étudier si certains programmes d'entraînement visant à automatiser le traitement du signal avertisseur pourraient contribuer à améliorer son efficacité en diminuant les ressources attentionnelles nécessaires.

Enfin, étant donné la grande variabilité interindividuelle chez les conducteurs, nous recommandons le développement de systèmes adaptatifs qui pourraient tenir compte de certaines caractéristiques des conducteurs.

RÉFÉRENCES

- Abe, G., Itoh, M., & Tanaka, K. (2002). Dynamics of drivers' trust in warning systems. Paper presented at the *15th IFAC World Congress*, Barcelona, Spain.
- Abe, G., Itoh, M., & Yamamura, T. (2011). Visual distraction when driving and its influence on driver response to a forward collision warning system. Paper presented at the *SICE Annual Conference*, Tokyo, Japan.
- Abe, G., & Richardson, J. (2004). The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(4-5), 307-322.
- Abe, G., & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics*, 37(5), 577-586.
- Aguera, P. E., Jerbi, K., Caclin, A., & Bertrand, O. (2011). ELAN: A Software Package for Analysis and Visualization of MEG, EEG, and LFP Signals. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 1-11.
- Baddeley, A., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*. Vol 8. (pp. 47-89). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A(1), 5-28.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, 4(11), 417-423.
- Bayly, M., Fildes, B., Regan, M., & Young, K. (2007). Review of crash effectiveness of Intelligent Transport Systems. Project No. 027763 – *TRACE*.
- Belz, S. M., Robinson, G. S., & Casali, J. G. (1999). A new class of auditory warning signals for complex systems: auditory icons. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 41(4), 608-618.
- Bella, F., & Russo, R. (2011). A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 676-686.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., & Shinar, D. (2002). Effects of an In-Vehicle Collision Avoidance Warning System on Short- and Long-Term Driving Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 335-342.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 24(4), 473-486.
- Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. [doi: DOI: 10.1016/j.apergo.2003.07.003]. *Applied Ergonomics*, 34(6), 499-509.
- Boulinguez, P., Jaffard, M., Granjon, L., & Benraiss, A. (2008). Warning Signals Induce Automatic EMG Activations and Proactive Volitional Inhibition: Evidence From Analysis of Error Distribution in Simple RT. *Journal of Neurophysiology*, 99(3), 1572-1578.
- Bowyer, S. M., Hsieh, L., Moran, J. E., Young, R. A., Manoharan, A., Liao, C.-c. J., . . . Tepley, N. (2009). Conversation effects on neural mechanisms underlying reaction time to visual events while viewing a driving scene using MEG. *Brain Research*, 1251, 151-161.

- Braitman, K. A., McCartt, A. T., Zuby, D. S., & Singer, J. (2010). Volvo and Infiniti drivers' experiences with select crash avoidance technologies. *Traffic Injury Prevention*, 11(3), 270-278.
- Breuer, J. J., Faulhaber, A., Frank, P., & Gleissner, S. (2007). Real world safety benefits of brake assistance systems. Paper presented at the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Lyon, France.
- Broadbent, D. (1958). *Perception and communication*. Londres: Pergamon Press.
- Brouwer, W. H. (2002). Attention and driving: A cognitive neuropsychological approach. In P. Zimmermann & M. Leclercq (Eds.), *Applied Neuropsychology of Attention* (pp. 223-248). Hove: Psychology Press.
- Brown, T. L., Lee, J. D., & McGehee, D. V. (2001). Human Performance Models and Rear-End Collision Avoidance Algorithms. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), 462-482.
- Bruyas, M. P., Chapon, A., Lelekov-Boissard, T., Letisserand, D., Duraz, M., & Aillerie, I. (2006). Evaluation de l'impact de communications vocales sur la conduite automobile. [An evaluation of the impact of vocal communication on the driving task]. *Recherche Transports Sécurité*, 91, 99-119.
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., & Fort, A. (2012). An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. *Brain Research*, 1470, 69-79.
- Bueno, M., Fort, A., Francois, M., Ndiaye, D., Deleurence, P., & Fabrigoule, C. (2013). Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective. *Neuroscience Letters*, 541, 219-223.
- Bueno, V. F., & Ribeiro-do-Valle, L. E. (2012). Facilitatory effects of an auditory warning stimulus in a visual location identification task and a visual shape identification task. *Brazilian journal of medical and biological research*, 45, 1037-1044.
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, 167, 27-37.
- Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L., & McCallum, M. (2007). Crash Warning System Interfaces: Human Factors Insights and Lessons Learned Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration
- Carsten, O., & Jamson, H. (2011). Driving simulators as research tools in traffic psychology. In B. E. Porter (Ed.), *Handbook of traffic psychology* (pp. 87-96). UK, USA: Academic press.
- Clark, V. P., & Hillyard, S. A. (1996). Spatial selective attention affects early extrastriate but not striate components of the visual evoked potential. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(5), 387-402.
- Cohen, R. M., Semple, W. E., Gross, M., Holcomb, H. J., Dowling, S. M., & Nordahl, T. E. (1988). Functional localization of sustained attention. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 1, 3-20.
- Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: an introduction. In M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of Mind: Event-Related Brain Potentials and Cognition* (pp. 1-26). New York: Oxford University Press.
- Collet, C., Clarion, A., Morel, M., Chapon, A., & Petit, C. (2009). Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving. *Applied Ergonomics*, 40(6), 1041-1046.
- Comte, S. L. (2000). New systems: new behaviour? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 3(2), 95-111.
- Correa, Á., Lupiáñez, J., Madrid, E., & Tudela, P. (2006). Temporal attention enhances early visual processing: A review and new evidence from event-related potentials. *Brain Research*, 1076(1), 116-128.
- Correa, Á., Triviño, M., Pérez-Dueñas, C., Acosta, A., & Lupiáñez, J. (2010). Temporal preparation, response inhibition and impulsivity. *Brain and Cognition*, 73(3), 222-228.
- Coull, J. T. (1998). Neural correlates of attention and arousal: insights from electrophysiology, functional neuroimaging and psychopharmacology. *Progress in Neurobiology*, 55(4), 343-361.
- Cummings, M. L., Kilgore, R. M., Wang, E., Tijerina, L., & Kochhar, D. S. (2007). Effects of Single Versus Multiple Warnings on Driver Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(6), 1097-1106.
- Chun, J., Han, S. H., Park, G., Seo, J., lee, I., & Choi, S. (2012). Evaluation of vibrotactile feedback for forward collision warning on the steering wheel and seatbelt. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 443-448.
- Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, 7, 80-90.

- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., . . . Knipling, R. R. (2006). The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration.
- Drews, F. A., Yazdani, H., Godfrey, C. N., Cooper, J. M., & Strayer, D. L. (2009). Text Messaging During Simulated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(5), 762-770.
- Edworthy, J., Loxley, S., & Dennis, I. (1991). Improving auditory warning design: relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 33, 205-232.
- Eichelberger, A. H., & McCartt, A. T. (2012). Volvo Drivers' Experiences with Advanced Crash Avoidance and Related Technologies. Arlington,: Insurance Institute for Highway Safety.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- European Statement of Principles on Human Machine Interface for In-Vehicle Information and Communication Systems (1998).
- European Commission. (2006). CARE - GLOSSARY (EU road accidents database) from http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/care_reports_graphics/care_what_is_it/index_en.htm
- European Commission. (2010). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Towards a European road safety area: policy orientations on road safety 2011-2020. Brussels,: European Commission.
- Implementing Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to type-approval requirements for certain categories of motor vehicles with regard to advances emergency braking systems, D5 682417 C.F.R. (2011).
- European Commission. (2013). EU road fatalities Retrieved 29 April, 2013, from http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/observatory/trends_figures.pdf
- Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, their trailers and systems, components and separate technical units intended therefor (2009).
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340–347.
- Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2007). Warning signals influence motor processing. *Journal of neurophysiology*, 97, 1600-1609.
- Fischer, R., Plessow, F., & Kiesel, A. (2012). The effects of alerting signals in action control: activation of S–R associations or inhibition of executive control processes? *Psychological Research*, 76(3), 317-328.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: a review. *Psychophysiology*, 45(1), 152-170.
- Forkenbrock, G. J., & O'Harra, B. C. (2009). A Forward Collision Warning (FCW) performance evaluation. Paper presented at the *21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Stuttgart, Germany.
- Fort, A., Collette, B., Bueno, M., Deleurence, P., & Bonnard, A. (2013). Impact of totally and partially predictive alert in distracted and undistracted subjects: An event related potential study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 578-586.
- Fort, A., Martin, R., Jacquet-Andrieu, A., Combe-Pangaud, C., Foliot, G., Daligault, S., & Delpuech, C. (2010). Attentional demand and processing of relevant visual information during simulated driving: A MEG study. *Brain Research*, 1363, 117-127.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. [doi: DOI: 10.1016/j.aap.2004.11.003]. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- Funes, M. J., & Lupiañez, J. (2003). La teoría atencional de Posner: una tarea para medir las funciones atencionales de Orientación, Alerta y Control Cognitivo y la interacción entre ellas. *Psicothema*, 15(2), 260-266.
- Gabaude, C., Baraca, B., Jallais, C., Bonniaud, M., & Fort, A. (2012). Cognitive load measurement while driving. Paper presented at the *Human Factors: a view from an integrative perspective*, Toulouse, France.
- Georgi, A., Zimmermann, M., Lich, T., Blank, L., Kickler, N., & Marchthaler, R. (2009). New approach of accident benefit analysis for rear end collision avoidance and mitigation systems. Paper presented at the *21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Stuttgart, Germany.

- Gietelink, O. J., Ploeg, J., De Schutter, B., & Verhaegen, M. (2009). Development of a driver information and warning system with vehicle hardware-in-the-loop simulations. *Mechatronics*, 19(7), 1091-1104.
- Graham, R. (1999). Use of auditory icons as emergency warnings: evaluation within a vehicle collision avoidance application. *Ergonomics*, 42(9), 1233-1248.
- Grover, C., Knight, I., Okoro, F., Simmons, I., Couper, G., Massie, P., & Smith, B. (2008). Automated Emergency Brake Systems: Technical requirements, costs and benefits: TRL Limited.
- Hackley, S. A., & Valle-Inclán, F. (2003). Which stages of processing are speeded by a warning signal? *Biological Psychology*, 64(1-2), 27-45.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., Trbovich, P. L., & Eizenman, M. (2007). An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 372-379.
- Harder, K. A., Bloomfield, J., & Chihak, B. J. (2003). The Effectiveness of Auditory Side- and Forward-Collision Warnings in Winter Driving Conditions. Minnesota: University of Minnesota.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. H. a. N. Meshkati (Ed.), *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press.
- Highway Loss Data Institute. (2012a). Acura collision avoidance features: initial results. *Bulletin* 28(21), 1-8.
- Highway Loss Data Institute. (2012b). Mercedes-Benz collision avoidance features: initial results. *Bulletin* 29(7), 1-22.
- Highway Loss Data Institute. (2012c). Volvo collision avoidance features: initial results. *Bulletin*, 29(5), 1-11.
- Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2007). Multisensory In-Car Warning Signals for Collision Avoidance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(6), 1107-1114.
- Ho, C., & Spence, C. (2009). Using peripersonal warning signals to orient a driver's gaze. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(4), 539-556.
- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J., & Brown, J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 185-191.
- Hurts, K., Angell, L. S., & Perez, M. A. (2011). The Distracted Driver Mechanisms, Models, and Measurement. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 7(1), 3-57.
- Huth, V., Bueno, M., Fort, A., & Brusque, C. (2014). Synthesis of new knowledge on drivers' adaptation processes in response to ADAS issued from the ADAPTATION project. In A Stevens, C Brusque & J Krems (Eds). *Driver adaptation to information and assistance systems*. IET published book. ISBN: 978-1-84919-639-0; E-ISBN: 978-1-84919-640-6
- Ikari, T., Kaito, K., Nakajima, T., Yamazaki, K., & Ono, K. (2009). Japan new car assessment program for minor neck injury protection in rear end collisions. Paper presented at the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Stuttgart, Germany.
- ISO 15623. (2002). Transport information and control systems - Forward vehicle collision warning systems - Performance requirements and test procedures.
- Itoh, M., Horikome, T., & Inagaki, T. (2013). Effectiveness and driver acceptance of a semi-autonomous forward obstacle collision avoidance system. *Applied Ergonomics*, 44(5), 756-763.
- Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. M. J. (2008). Potential benefits of an adaptive forward collision warning system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(4), 471-484.
- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 79-96.
- Jamson, A. H., Westerman, S. J., Hockey, G. R., & Carsten, O. M. (2004). Speech-based E-mail and driver behavior: effects of an in-vehicle message system interface. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(4), 625-639.
- Jasper, H. H. (1958). The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375
- Kaber, D. B., Liang, Y., Zhang, Y., Rogers, M. L., & Gangakhedkar, S. (2012). Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(5), 491-501.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Londres: Prentice Hall.

- Key, A. P. F., Dove, G. O., & Maguire, M. J. (2005). Linking Brainwaves to the Brain: An ERP Primer. *Developmental neuropsychology*, 27(2), 183–215.
- Kidd, D. G., Nelson, E. T., & Baldwin, C. L. (2010). The Effects of Repeated Exposures to Collision Warnings on Drivers' Willingness to Engage in a Distracting Secondary Task. Paper presented at the *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 54th Annual Meeting*, Santa Monica, CA.
- Kiefer, R., LeBlanc, D., Palmer, M., Salinger, J., Deering, R., & Shulman, M. (1999). Development and validation of functional definitions and evaluation procedures for collision warning/avoidance systems. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Kiefer, R. J., Cassar, M. T., Flannagan, C. A., Jerome, C. J., & Palmer, M. D. (2005). Surprise Braking Trials, Time-to-Collision Judgments, and "First Look" Maneuvers Under Realistic Rear-End Crash Scenarios. Michigan: Crash Avoidance Metrics Partnership.
- Knipling, R. R., Wang, J. S., & Yin, H. M. (1993). Rear-end Crashes: Problem size assessment and statistical description. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Kramer, A. F., Cassavaugh, N., Horrey, W. J., Becic, E., & Mayhugh, J. L. (2007). Influence of Age and Proximity Warning Devices on Collision Avoidance in Simulated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 935-949.
- Kutas, M., & Dale, A. (1997). Electrical and magnetic readings of mental functions. In M. D. Rugg (Ed.), *Cognitive Neuroscience* (pp. 197-241). Hove East Sussex, UK: Psychology Press.
- Lamble, D., Kauranen, T., Laakso, M., & Summala, H. (1999). Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving. *Accident Analysis & Prevention*, 31(6), 617-623.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 314-334.
- Lees, M. (2010). *Context conditions drivers' disposition towards alarms*. Philosophy degree in Industrial Engineering, University of Iowa, Iowa.
- Lerner, N. D., Dekker, D. K., Steinberg, G. V., & Huey, R. W. (1996). Inappropriate Alarm Rates and Driver Annoyance. Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration.
- Loveless, N. E. (1973). The contingent negative variation related to preparatory set in a reaction time situation with variable foreperiod. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 35(4), 369-374.
- Luck, S. L. (2005). *An introduction to the Event-Related Potential technique*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Mackintosh, N. J. (1974). *The psychology of animal learning*. New York: Academic Press.
- Maltz, M., & Shinar, D. (2004). Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(2), 357-366.
- Maltz, M., & Shinar, D. (2007). Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid distracted drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(4), 345-357.
- McKeever, B. B. (1998). Working Paper: Estimating the Potential Safety Benefits of Intelligent Transportation Systems. Washington: Mitretek Systems.
- McLaughlin, S. B. (2007). *Analytic Assessment of Collision Avoidance Systems and Driver Dynamic Performance in Rear-End Crashes and Near-Crashes* PhD Virginia Polytechnic Institute and State University Virginia
- McLaughlin, S. B., Hankey, J. M., & Dingus, T. A. (2007). A method for evaluating collision avoidance systems using naturalistic driving data. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 8-16.
- McLaughlin, S. B., Hankey, J. M., Dingus, T. A., & Klauer, S. G. (2009). Development of an FCW Algorithm Evaluation Methodology With Evaluation of Three Alert Algorithms. Virginia: Virginia Tech Transportation Institute.
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69, 220-232.
- Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C., & 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.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? In L. A. Evans & R. Schwing (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Driver Behavior and Traffic Safety. General Motors Research Laboratories* (pp. 485-520). New-York: Plenum Press.

- Mohebbi, R., Gray, R., & Tan, H. Z. (2009). Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(1), 102-110.
- Muhrer, E., & Vollrath, M. (2010). Expectations while car following--the consequences for driving behaviour in a simulated driving task. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 2158-2164.
- Murher, E., Reinprecht, K., & Vollrath, M. (2012). Driving With a Partially Autonomous Forward Collision Warning System: How Do Drivers React? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 698-708.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1987). N2 and automatic versus controlled processes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 38, 169-186.
- Najm, W. G., Stearns, M. D., Howarth, H., Koopmann, J., & Hitz, J. (2006). Evaluation of an automotive rear end collision avoidance system. Cambridge: U.S. Department of Transportation.
- NHTSA. (2009). Traffic safety facts 2009: A compilation of motor vehicle crash data from the fatality analysis reporting system and the general estimates system. Washington: National Highway Traffic Safety Administration.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and Self-Regulation* (Vol. 4, pp. 1-18). New York and London: Plenum Press.
- OECD. (1990). Behavioural adaptations to changes in the road transport system. Paris.
- OECD. (2003). Road Safety: Impact of new technologies: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Östlund, J., Peters, B., Thorslund, B., Engström, J., Markkula, G., Keinath, A., . . . Foehl, U. (2005). Driving performance assessment methods and metrics *Project no IST-1-507674-IP*.
- Parasuraman, R., Hancock, P. A., & Olofinboba, O. (1997). Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. *Ergonomics*, 40(3), 390-399.
- Patel, S. H., & Azzam, P. N. (2005). Characterization of N200 and P3000: selected studies of the event-related potential. *International Journal of Medical Sciences*, 2, 147-154.
- Pauzié, A., & Amditis, A. (2011). Intelligent Driver Support System functions in cars and their potential consequences on safety. In Y. Barnard, R. Risser & J. Krems (Eds.), *Safety of Intelligent Driver Support Systems: Design, Evaluation, and Social perspectives* (pp. 7-25): Ashgate Publishing Limited.
- Pettitt, M., Burnett, G., & Stevens, A. (2005). Defining driver distraction. Paper presented at the 12th World Congress on ITS, San Francisco, US.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128-2148.
- Posner, M. I. (1994). Attention: The mechanisms of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 7398-7403.
- Posner, M. I. (2008). Measuring alertness. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1129, 193-199.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42.
- Posner, M. I., & Snyder, C. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Ed.), *Information processing and cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Raabe, M., Rutschmann, R. M., Schrauf, M., & Greenl, M. W. (2005). Neural Correlates of Simulated Driving: Auditory Oddball Responses Dependent on Workload Paper presented at the *HCI International*, Las Vegas, Nevada (USA).
- Rakauskas, M. E., Ward, N. J., Bernat, E. M., Cadwallader, M., Patrick, C. J., & de Waard, D. (2005). Psychophysiological measures of driver distraction and workload while intoxicated. Paper presented at the 3rd International Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, Rockport, Maine.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Recarte, M. A., & Nunes, L. M. (2000). Effects of verbal and spatial-imagery tasks on eye fixations while driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(1), 31-43.
- Reitan, R. (1958). Validity of the trail making test as an indicator of organic brain damage. *Perceptual and Motor Skills*, 8(271-276).
- Rudell, A. P., & Hu, B. (2001). Does a warning signal accelerate the processing of sensory information? Evidence from recognition potential responses to high and low frequency words. *International Journal of Psychophysiology*, 41(1), 31-42.
- Rudin-Brown, C. M., & Noy, Y. I. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record*, 1803, 30-37.

- 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, 59-76.
- Saad, F., Hjälm Dahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., . . . Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects *AIDE Project, Deliverable D1.2.1*. Brussels: Information Society Technologies.
- SAE J2400. (2003). Human Factors in Forward Collision Warning Systems: Operating Characteristics and User Interface Requirements: SAE International Surface Vehicle Information Report.
- Santangelo, V., Van der Lubbe, R. H., Olivetti Belardinelli, M., & Postma, A. (2008). Multisensory integration affects ERP components elicited by exogenous cues. *Experimental Brain Research*, 185(2), 269-277.
- Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., & De Waard, D. (2005). The interaction between driving and in-vehicle information systems: Comparison of results from laboratory, simulator and real-world studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 135-146.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: Detection, search and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1-126.
- Schoitsch, E. (2008). Analysis and assessment of potential scenarios. Deliverable D1.1 ADOSE - Project no 216049
- Schömig, N., & Metz, B. (2013). Three levels of situation awareness in driving with secondary tasks. *Situation Awareness and Safety*, 56, 44-51.
- Schweizer, T. A., Kan, K., Hung, Y., Tam, F., Naglie, G., & Graham, S. J. (2013). Brain activity during driving with distraction: an immersive fMRI study. *Frontiers in human neuroscience*, 7(53), 1-11.
- Seiler, P., Song, B., & Hedrick, J. K. (1998). Development of a Collision Avoidance System. Paper presented at the *Society of Automotive Engineers*, International Congress & Exposition.
- Singh, S. (2003). Driver Attributes and Rear-end Crash Involvement Propensity. Washington: National Highway Traffic Safety Administration
- Spence, C., & Santangelo, V. (2009). Capturing spatial attention with multisensory cues: A review. *Hearing Research*, 258(1-2), 134-142.
- Stein, A. C., Solomon, R. A., & Ziedman, D. A. (1992). Field Evaluation of the Radar Control Systems (RCS) Radar Anti-Collision Warning System. Hawthorne, CA: Systems Technology, Inc.
- Strayer, D. L., & Drews, F. A. (2007). Multitasking in the automobile. In A. Kramer, D. Wiegmann & A. Kirlik (Eds.), *Attention: From Theory to Practice*. New York: Oxford University Press.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., Albert, R. W., & Johnston, W. A. (2001). Cell phone induced perceptual impairments during simulated driving. Paper presented at the *First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Aspen, Colo.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Sturm, W., & Willmes, K. (2000). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness. *Neuroimage*, 14(1), S76-S84.
- Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31(4), 491-506.
- Treisman, A. M. (1964). Verbal cues, language and meaning in selective attention. *The American Journal of Psychology* 77(2), 206-219.
- Uchiyama, Y., Toyoda, H., Sakai, H., Shin, D., Ebe, K., & Sadato, N. (2012). Suppression of brain activity related to a car-following task with an auditory task: An fMRI study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(1), 25-37.
- UNECE. (2007). Statistics of road traffic accidents in Europe and North America (Vol. LI). New York and Geneva: United Nations Economic Commission for Europe.
- UNECE. (2011). Statistics of road traffic accidents in Europe and North America (Vol. LII). New York and Geneva: United Nations Economic Commission for Europe.
- United Nations. (2010). Resolution adopted by the General Assembly. Retrieved 29 April, 2013, from http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/UN_GA_resolution-54-255-en.pdf
- Van der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(1), 1-10.
- Van Kampen, B. (2003). Case study: rear end or chain accidents. The Netherlands: SWOV Institute for Road Safety Reserch.

- Van Zomeren, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). *Clinical neuropsychology of attention*. New York: Oxford University Press.
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, 37(2), 190-203.
- Vogel, L., & Bester, C. J. (2005). A relationship between accident types and causes. Paper presented at the 24th Southern African Transport Conference, South Africa.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* 25(203), 380-384.
- Wang, Y., Mehler, B., Reimer, B., Lammers, V., D'Ambrosio, L. A., & Coughlin, J. F. (2010). The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: A comparison with field testing. *Ergonomics*, 53(3), 404-420.
- Watanabe, Y., & Ito, S. (2007). Influence of vehicle properties and human attributes on neck injuries in rear-end collisions. Paper presented at the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Lyon, France.
- Wechsler, D. (1981). *Wechsler Adult and Intelligence scale Revised*. New-York: Psychological Corporation.
- Wege, C., & Victor, T. (2010). ADAS function selection, benchmark, behavioural adaptation effects, research questions, hypotheses, and conceptual framework development. Project no 238833 - ADAPTATION
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Ed.), *Attention and performance* (pp. 239-257). Hillsdale: NJ Erlbaum.
- Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*. London: Academic Press.
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomical Science*, 3, 159-177.
- Wickens, C. D., & Dixon, S. R. (2007). The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(3), 201-212.
- Wild-Wall, N., Hahn, M., & Falkenstein, M. (2011). Preparatory processes and compensatory effort in older and younger participants in a driving-like dual task. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(2), 91-102.
- Wilde, G. J. S. (1982). The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2(4), 209-225.
- World Health Organization. (2004). World report on road traffic injury prevention. Geneva.
- World Health Organization. (2011). Causes of death 2008. Retrieved 29 April 2013, from <http://www.who.int/evidence/bod>
- Young, K., & Regan, M. A. (2007). Driver distraction: A review of the literature. In I. J. Faulks, M. Regan, M. Stevenson, J. Brown, A. Porter & J. D. Irwin (Eds.), *Distracted driving* (pp. 379-405). Sydney, NSW: Australasian College of Road Safety.
- Zhu, B. (2001). *Potential Effects on Accidents from Forward Collision Warning/Avoidance System*. Master Thesis, Linköping University, Sweden.

ANNEXES



ANNEXE 1

Annexe 1 : Chapitre d'ouvrage

Dans le cadre du projet ADAPTATION, un livre collectif synthétisant l'ensemble des travaux individuels de recherche a été réalisé. L'annexe 1 présente le chapitre 12 de cet ouvrage qui résume la [section 2.1](#) de l'introduction de cette thèse.

Effectiveness of Forward Collision Warning Systems: a contribution from the cognitive analysis combining behavioural and electrophysiological measurements.³

Mercedes Bueno^{1, 2, 3}, Colette Fabrigoule³ and Alexandra Fort^{1, 2}

¹ IFSTTAR-LESCOT, 25 avenue François Mitterrand, F-69675 Bron, France

² University of Lyon, F-69622 Lyon, France

³ University Bordeaux Segalen, USR CNRS 3413 SANPSY, Hôpital Pellegrin, 13ème étage, Place Amélie Raba Léon, F-33076 Bordeaux, France

Abstract

This chapter discusses Forward Collision Warning Systems (FCWS), describing the characteristics and the functions of some of the systems currently on the market and presents an overview of

³ Bueno, M., Fabrigoule, C., and Fort, A. (2014). Effectiveness of Forward Collision Warning Systems: a contribution from the cognitive analysis combining behavioural and electrophysiological measures. In A Stevens, C Brusque & J Krems (Eds). *Driver adaptation to information and assistance systems*. IET published book. ISBN: 978-1-84919-639-0; E-ISBN: 978-1-84919-640-6

behavioural studies evaluating the effectiveness of these systems on road and in simulators. Results are presented from recent studies using electroencephalography and the associated Event Related Potentials allowing, through the analysis of brain activity, a more in-depth understanding of the nature of the cognitive processes in the context of FCWS. These studies address three important questions:

1. Are FCWS as effective as they are expected to be when drivers are distracted?
2. What are the consequences of driving with a system that is not completely reliable?
3. Is there any behavioural adaptation to the FCWS over their use in time? Are the consequences of this adaptation positive or negative?

The chapter shows that FCWS provides potential benefits for road safety, but certain factors such as the attentional state of drivers but the reliability level of the system can mitigate its effectiveness.

12.1 Introduction

Advanced driver assistance systems (ADAS) have experienced a rapid development in recent years to optimise their potential benefits on road safety. It has been estimated that these systems contribute to reducing the number of casualties on the roads. Because of this, the European Commission has recently proposed the mandatory installation of some ADAS such as the lane departure warning system and the collision warning system in heavy vehicles from 1st November 2013 [1]. Nevertheless, light vehicles will be exempted at present because of the lower benefit-to-cost ratio compared to heavy vehicles.

Since ADAS have appeared on the market, research in the field of human factor has been promoted to investigate the impact of both the benefits of these systems on drivers' behaviour and their potential failures or limitations. Some of these systems warn drivers by an audible, visual or/and haptic signal when inappropriate behaviour is detected, either because an action is required but is not carried out or because the action carried out is not the right one. This chapter presents a review of the literature focused on a particular ADAS, the Forward Collision Warning System (FCWS). Nevertheless, some of the questions and discussions considered here could be applied to other warning systems.

FCWS are designed to reduce the number and/or to avoid rear-end collisions by providing warning to drivers. Traditional behavioural measures obtained in driving simulators and field operational tests are useful tools for evaluating the effectiveness of such systems, but they are not the only ones. Physiological data obtained through the event related potential technique can complement behavioural data. Reporting on data from these different methodological approaches, we discuss whether the system reaches one of its main objectives, i.e. to assist distracted drivers, and then how the system reliability affects the efficiency of the system and driver's acceptance. Finally, in the last section of this chapter certain studies examining the behavioural adaptation to the system are presented. Specifically, the effects on behaviour due to driving with the system over the time (from the introduction of the system to long term effects of ADAS use) and the consequences of driving without the system after a period of habituation to the system are discussed.

12.2 The utility of FCWS

As mentioned above, FCWS have been developed to warn drivers of potential rear-end collisions. Although the percentage of these collisions resulting in fatalities is relatively low compared to the percentage of injuries [2], these accidents are one of the most prevalent types of collision, disturbing traffic flow and representing an important economic cost for society. The environment (e.g. poor visibility, road type) and the vehicle (e.g. defective brakes) are some of the contributing factors to the rear-end collisions, in 5 - 11% and 12 - 20% of these accidents, respectively. However, the factor that most frequently contributes to rear-end collisions is the driver, accounting for between 75 - 93% of the cases. More precisely, inside the driver category, distraction has been involved in about 60% of the rear-end collisions [3, 4].

FCWS are based on sensors which continuously monitor certain parameters such as the relative speed, lateral position and distance between two vehicles. Although a wide variety of algorithms have been designed to calculate the moment for triggering the warning, most of them are based either on the time to collision between the obstacle and the following vehicle or on the minimum distance required to stop the vehicle safely [5]. When a certain threshold value is reached, predicting a potential risk of collision, the system provides a warning signal (e.g. visual, auditory, and/or tactile) to alert the driver.

The system, as well as providing assistance by warning the driver (Forward Collision Warning Systems), can also take an active part in the braking process by preparing and/or by applying partial or full braking automatically (Forward Collision Avoidance Systems). This active avoidance module could prevent or reduce the severity of the collision should the driver not react in time or not react at all. Moreover, the active avoidance system has become more relevant in preventing collisions since it has been demonstrated that most drivers do not apply enough force on the brake pedal [6] and that a high percentage of drivers only release the accelerator pedal or even do not react at all [7].

Driving simulators have been one of the most frequent tools used in the evaluation of FCWS and most research has shown positive effects of the system when drivers are undistracted. This benefit has been demonstrated, for example, by a reduction of the number of collisions [8], by faster braking reaction times following the detection of critical situations [9], and by the adoption of longer and safer headways [10]. Other studies such as Georgi et al. [11], have estimated the benefits of the system by developing models which apply the algorithm used by the system in real-life accidents. They categorized three different types of driver: lethargic drivers with the longest reaction times and lowest decelerations, realistic drivers as an intermediate level, and best drivers with the fastest reaction times and highest decelerations. According to their predictions, FCWS prevented 74% of collisions for best drivers, 38% for realistic drivers and 1% for lethargic drivers. In a more ecological context, using a field operational test, Najm et al. [7] assessed the impact of FCWS and advance cruise control (ACC) systems for four weeks. 66 drivers drove without the system during the first week to obtain the baseline and with the system during the remaining three weeks. The results indicated that the exposure to conflicts (brake or steer at the last-second at a comfortable deceleration), near-crashes

(brake or steer at the last-second at a hard deceleration), and severe near-crashes (minimum time to collision less or equal to 3s and maximum deceleration greater than 0.3g) in the last period of the test were reduced in about 20% compared to the first period. Based on different rear-end collision databases, these authors estimated that the system could prevent about 10% of these accidents. These studies show a range of benefit from these systems which fluctuates from 10% to 70% approximately [12]. This wide range could be explained by the different variables considered in these studies such as the type of system used and its limitations, the methodological approach chosen, the characteristics of drivers or the weather conditions. Moreover, it is necessary to consider other factors which can have a direct impact on the effectiveness of the system. In this chapter, the impact of the system according to the attentional state of drivers as well as the impact of the system as a function of its reliability level will be analysed. Furthermore, in order to shed light on this aspect, we are going to consider an alternative research method to the classical behavioural data such as the electroencephalography and the associated event related potentials.

12.3 A new approach for evaluating the effectiveness of FCWS

Different tools are available for investigating the effect of this kind of assistance system, from the most fundamental techniques such as simplified simulator experiments conducted in a laboratory, to more realistic contexts using driving simulators and to almost or real driving conditions such as field operational tests and naturalistic driving experiments. Among these studies we can highlight the classical trade-off between experimental control and ecological validity.

Given the difficulty in simulating rear-end collisions in real-life situations, most studies are employing driving simulators where different scenarios as well as the severity of collisions can easily be manipulated. Behavioural measures (e.g. reaction time, steering wheel angle, speed) are used most frequently by researchers in these studies. Not only behavioural data can be recorded in driving simulators. Often, these measures can be enhanced by other complementary techniques such as the analysis of information given by drivers (i.e. questionnaires, in-depth interviews) or the analysis of physiological measures (i.e. electrooculography, galvanic skin response, heart rate, electroencephalography). Although physiological measures are still not very frequent in driving simulators, they provide complementary and additional information that in some cases is not observable in drivers' behavioural performance. In this part, we therefore will focus on the electroencephalography (EEG) and the associated Event Related Potential (ERP) techniques.

Electroencephalography is the study of the spontaneous electrical activity of the brain that can be recorded by electrodes placed on the scalp. Event Related Potentials are obtained from the electroencephalogram by filtering and averaging the activity time-locked to the stimulus of interest. The stimulus of interest is repeated a great number of time. The averaging allows reducing the random noise (i.e. movement artefacts), and so extracting the specific response to the target stimulus. As a result, a different succession of waves or components appears, depending on the type of stimulus presented and the nature of the task carried out. These components are usually designated

by a letter (N or P) corresponding to the polarity of the component (Negative or Positive) and a number corresponding to its position in the chronology (i.e. P1, N1, N2, P2, P3) or the classical latency of the peak (i.e. N185 corresponds to a negative component peaking around 185 ms following the stimulus of interest) (see Figure 12.1).

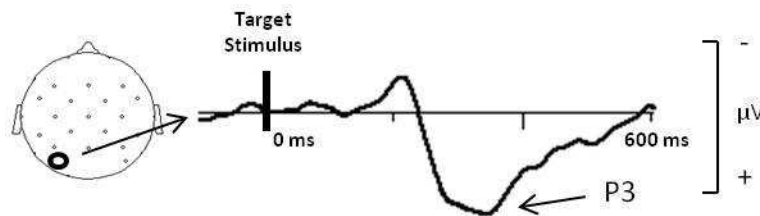


Figure 12.1 Example of a grand-average ERP showing a typical P3 component at parietal areas

This technique presents a high temporal resolution (on the order of milliseconds) which enables the identification of the different stages of information processing. The first stage of the neural processing chain can be identified even before the stimulus appears, reflecting the anticipation of a stimulus. For example, the contingent negative variation (CNV) is a slow negative wave appearing typically when two stimuli have been presented associated (Figure 12.2). Thus, when the first stimulus or warning always precedes the second or target stimulus, participants can expect the target stimulus and prepare their responses due to the appearance of the warning stimulus [13].

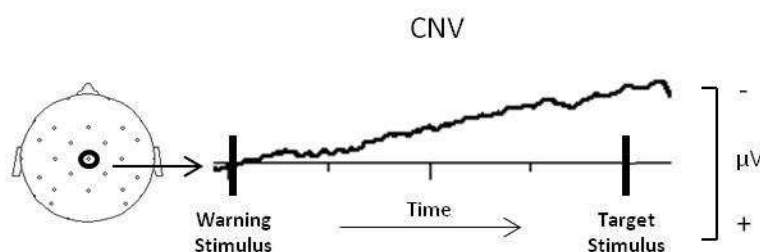


Figure 12.2 Example of a grand-average ERP showing a typical CNV component at central areas

In the 200 ms following the stimulus presentation, ERP components such as P1 and N1 have been linked to sensory processes as well as to the discriminative processing and are mainly modulated by physical attributes of the stimuli [14]. After about 200 ms, the later ERP components such as N2/P3 are thought to reflect higher cognitive processes. The N2 component is elicited by tasks involving cognitive control, novelty stimuli, perceptual matching and response conflict, and the attention required for the processing [15]. The P3 component can be used as an indicator of the attentional resources allocation and working memory updating [16, 17]. In general, it is possible to identify differences between experimental conditions by analysing the differences in ERP in terms of peak amplitude and/or peak latency of the ERP components of interest. In a broader sense, differences in peak amplitude of the wave could indicate the different degree of attentional resources engaged in the

processing of the stimulus, and differences in peak latency of the wave (earlier or later occurrence in time) could be related to the speed of stimulus information processing.

The implementation of the ERP technique in driving studies is not widespread due to some constraints, such as the high saccadic and motor movement sensitivity and the high number of trial repetitions required in order to reach an acceptable signal-to-noise ratio. Despite these constraints, there are a few ERP simulator studies which mainly investigate the negative effect of performing a concurrent cognitive task while driving [18, 19]. Nevertheless this technique has been implemented only recently in the study of advanced driver assistance systems and, specifically, in the study of FCWS [20].

12.4 Are FCWS effective for distracted drivers?

The major contributing factor to rear-end collisions is driver distraction or inattention. Therefore, if FCWS are expected to help distracted drivers in particular, the effectiveness of these systems should be evaluated according to the attentional state of the drivers, distracted or not.

Regan et al. [21] define driver inattention as ‘insufficient or no attention to activities critical for safe driving (p.5)’. Driver distraction, or driver-diverted attention, is a type of driver inattention where the attention to activities critical for safe driving is threatened by the diversion towards another competing activity. These competing activities can require cognitive, perceptual (i.e. visual, auditory), and/or motor resources, identifying the different distraction categories. Secondary visuo-motor tasks seem to produce the higher degree of interference with the driving task, although this could be mitigated by compensatory strategies. For example, visual concurrent tasks tend to impair lane keeping performance and increase the number of off-road glances but also induce speed reductions, whereas cognitive tasks generally provoke the opposite effect of visual concurrent tasks [22, 23].

Several reports have focused on the impact of FCWS on distracted drivers, but few studies have compared the distraction condition with the control situation (without any distraction); that is, assessing the impact of FCWS on distracted and also undistracted drivers. Data obtained in simulators show that distracted drivers also benefit from the warning systems by the reduction of the number of collisions [8], by faster braking reaction times in detecting critical situations [24], and/or by longer and safer headways [25]. Moreover, in some cases, the system even completely dissipates the negative effect of the secondary task [8, 26].

Electrophysiological studies have been recently conducted in driving contexts in order to assess the impact of secondary tasks. For example, Strayer and Drews [18] found that in a task where participants had to react to intermittent lead vehicle decelerations, the P3 amplitude was reduced and the P3 latency was delayed when they were engaged in phone conversations, suggesting a negative impact on the driving task when the memory load increased. Similarly, Rakauskas et al. [19] studied the impact of secondary tasks while driving and detecting unexpected sounds (oddball paradigm).

They found that the P3 amplitude to novel sounds was especially reduced by a cognitive secondary task presented by cell-phone, showing that the processing of novel information is deteriorated by the dual task. In the context of FCWS, the ERP technique was introduced only recently by Bueno et al. [20]. These authors conducted an ERP study in a simplified driving simulator to evaluate the impact of a surrogate FCWS according to the attentional state of the participants, distracted or not by a secondary cognitive task. Participants were instructed to follow a lead motorcycle and they had to react by decelerating when the brake light (target) of the lead motorcycle was lit up. An auditory warning could forewarn participants that the motorcycle was going to brake soon. The results showed that the warning system reduced the reaction time when participants were undistracted but not when they were distracted. ERP data showed a benefit from the warning system at higher cognitive level (N2) suggesting that the warning could enhance the temporal expectancy regarding the target. However, and in parallel to behavioural data, this effect was only observed in simple task condition and not when participants were distracted. A possible explanation for this unexpected result could come from the experimental design. Indeed, an initial deceleration of the motorcycle occurred systematically before braking in all trials, whether or not the braking was preceded by the warning signal. Thus, participants may have used this motorcycle deceleration as an additional and better predictor of the brake light occurrence instead of the warning signal which was not always reliable. Therefore, in a recent study, Bueno et al [27] eliminated the predictive value of this motorcycle deceleration for the forthcoming brake light in order to increase the effectiveness of the FCWS under dual task conditions. The results indicated that participants were faster when they had available the warning signal compared to when no warning signal was given. At the electrophysiological level, this warning effect occurred at preparatory (increase of the amplitude of the CNV) and higher cognitive level (reduction of the peak latency of the P3). In addition, a strong negative impact of the secondary task was observed at behavioural and electrophysiological level with or without the system. This result suggests that the presence of the warning was not enough to compensate the negative effect of the dual task.

These last two studies have contributed to an increase in the knowledge about the processing of warning signals in driving. According to these results, it seems that the warning signal intervenes in motor preparation process (CNV) and higher cognitive processing (P3). These findings are also consistent with the findings of earlier non-driving studies showing warning signal operates in the stage of response selection [28] and that it could reduce the peak latency of the P3 [29].

Contrary to the positive effects on distracted drivers presented at the beginning of this section, the last two studies analysed here [20, 27] showed that the warning system was not always effective when drivers were distracted. Therefore, at present it is not clear whether these systems achieve their main purpose of mitigating the negative effects of the distraction. Although conclusions could not be drawn due to the limited number of studies evaluating the impact of the FCWS in distracted and undistracted drivers and their diverse methodology employed, there are some relevant questions to be considered.

Firstly, given that secondary tasks can differ in modality (visual, auditory, cognitive, etc.) and complexity level, the effectiveness of the system could vary depending on the type and difficulty of the secondary task. It could be possible that the dual task interferes with the warning signal when both warning and secondary task share the same modality. It is known that in dual task paradigms, the likelihood of interference produced when performing two tasks from the same modality (e.g. both tasks are auditory) is higher than when these tasks belong to different modalities (e.g. visual and auditory) [30]. As a result, the effectiveness of an auditory warning could see reduced if, for example, drivers are distracted by a secondary auditory task. Thus, auditory and visual-auditory warnings seem to be effective in helping drivers to detect potential collisions when they are distracted by a visual secondary task [8, 24, 26]. However, when the nature of the secondary task is auditory (i.e. phone conversations) and also when the complexity of the task increases (i.e. mental mathematics and categorisation questions), an auditory warning seems less effective than a tactile warning [31].

Secondly, from research using driving simulators [32] or ERP approach (but in non-driving related contexts [33]), multimodal warnings seem to be more effective than unimodal warnings. Indeed, receiving redundant warnings from two different modalities could be advantageous in the case of distraction or in the case of warning failures.

Finally, the difficulty level of the secondary task could also undermine the effectiveness of the warning system. It is known that the amount of attentional resources available is considerably reduced by the presence of another competitive task [30, 34]. When secondary tasks are highly demanding on a cognitive level, it might be possible that participants need to invest a lot of attentional resources to dealing with both tasks at the same time. Consequently, it is possible that the warning signal cannot be completely processed given the lack of attentional resources available, as could have occurred in the study of Bueno et al. [20]. In another study conducted in our laboratory, we investigated the impact of the difficulty of the secondary task on the effectiveness of the warning system. In this study in a driving simulator, only behavioural measures were recorded. The results showed an increase in the reaction time (RT) when participants were distracted by a high difficulty cognitive secondary task, but also when they were distracted by a low difficulty secondary task. However, when the warning system was available, RTs were shorter than the baseline (no warning, no distraction) only in the condition of low difficulty distraction, suggesting that the benefit from the system, at least partly, depends on the drivers' attentional resources available (manuscript in preparation). This result could support the hypothesis that warning signals are not treated automatically and need attentional resources to be processed.

12.5 Does the reliability of the system affect its effectiveness?

Besides drivers' attentional state, the effectiveness and acceptance of the system and driver behaviour may also be affected by the reliability level of the system. Indeed, depending on the type of algorithm and scan sensor, the system may malfunction, producing false alerts and/or misses of critical events. False alerts refer to the situations in which an alert is issued in the absence of any

potential collision, for example, when there are highly reflective objects. Nuisance alerts can be defined as alerts triggered in an appropriate situation but perceived by drivers as inappropriate because of their frequency, timing, intensity or modality [35]. Nuisance alerts can also be considered as alerts triggered in an inappropriate situation but whose origin could be justified by the presence of a potential threat (i.e. an alert triggered by a stationary vehicle placed out of or near the driver's line) [36]. Misses occur when an alert is not triggered despite the situation requiring it. Such failures are due to the fact that the capacity to detect obstacles could be limited in situations such as bad weather, detecting two-wheeled vehicles, pedestrians, stationary obstacles or very slow-moving vehicles, swerving vehicles or vehicles in bends, abrupt accelerating or decelerating. Because of these limitations, no FCWS currently works perfectly.

Real data about the false alert and miss rates are not frequent in the literature, but the existing data suggests that this rate is still far from acceptable. As already mentioned, Najm et al. [7] collated data from drivers who drove with a vehicle fitted with Advance Cruise Control and FCWS during one month. Their results showed that 44% of the alerts were false alerts and only 56% of all warnings were triggered by in-path targets (whether all of these alerts were necessary or not is unknown). McLaughlin et al. [37] evaluated the algorithm used in the previous study using real-crash data and compared it with two other algorithms. Their results showed a benefit from the first system of about 60%. However, this algorithm also accounted with the higher warning frequency, 87 alerts per 161 km driven, compared to the two other algorithms, 83 and 8 alerts per 161 km driven, respectively. Taking into account the recommendation that no more than one nuisance alert per 322 km would be an acceptable rate [38], the data presented above is not very encouraging.

Drivers' trust in the warning system could be considerably undermined if the number of nuisance or false alerts is too high, because these alerts are irritating and distractive [39]. As a result, the acceptance of the warning could be reduced and, therefore, it is likely that users ignore or react inadequately to further warnings, whether or not they are valid [40]. Moreover, concerning behavioural changes in drivers' performance, false alerts seem to lengthen the braking reaction time [41] and to induce unnecessary deceleration responses [39]; however, a higher false alerts rate could be associated with increases in the speed since drivers would tend to ignore the warning [42]. Misses are also critical for the acceptance and trust in the system and drivers' performance could be affected by longer reaction times, even longer than driving with no system at all [41]. In addition, the speed could decrease with the increase of the misses which has been interpreted as a reduction of drivers' trust on the system [43].

Besides the rate of false alerts and misses, hit alerts (alerts delivered when a potential collision is imminent) could also be considered as ineffective depending on the timing in which the alert is triggered. In general, early alerts are more effective and account with a higher acceptance level by drivers than late alerts, but if they are prompted too early, they can be considered as nuisance or false alerts [44].

However not all false alerts and misses have negative effects. For example, nuisance alerts can improve the knowledge that drivers have about the way the system functions [36]. In addition, if a system never triggers a false alert, drivers could fail to react adequately when the first hit alert occurs [45]. On the other hand, if a system almost never fails to detect a potential collision, drivers may over-rely on it and become vulnerable or not react adequately, when, for example, driving another unequipped vehicle [45]. It is complicated to assess which level of false alerts/misses is acceptable, given that the probability of experiencing a rear-end collision is quite low, and the efforts for finding out the cut-off point have not been very conclusive as yet [38, 40].

Other studies have investigated the reliability of the system focusing on the percentage of true alerts without specifying the rate of false alerts or misses. In general, higher levels of reliability result in better performance, but the point where the system becomes useless remains uncertain. Bliss and Acton [46] noted that participants responded more frequently to the warning and manoeuvred more appropriately in avoiding collisions when the warning was 100% reliable. Nevertheless, Maltz and Shinar [39] and Ben-Yaacov et al. [10] did not find any differences between systems reliable at 60, 80-85, and 90-95%. Subsequently, Wickens and Dixon [47] carried out a meta-analysis of twenty two studies and concluded that a reliability level of 70% could be the criterion from which a system can be considered as an aid in avoiding rear-end collisions.

Finally, it should be noted that failures of the system could have different effects depending on certain driver characteristics such as age, driving experience [36], or attentional state. For example, an alert triggered too early could be considered as a nuisance alert for an undistracted driver but it could be a hit alert for a distracted driver. Abe et al. [25] discovered that drivers rated alerts as less unnecessary when they were distracted by a secondary visual task than when they were undistracted. Thus, it seems that distracted drivers try to compensate their lack of attentional resources by the aid of the system. Maltz and Shinar [48] did not find any differences in distracted groups with regard the percentage of the time spent in a danger or safe zone according to the reliability of the system (high, medium, and low reliability or 1, 4, and 8 errors per minute, respectively). Nevertheless, the analysis of drivers' performance in case the system failed to deliver an alert showed a higher rate of deceleration responses in the danger zone by the low reliability group compared to the medium and high reliability groups and control group. This result could suggest that even when distracted, drivers can adopt a safe behaviour when the system frequently fails in detecting the hazard; however, when the system is highly reliable, drivers did not compensate the error of the system. As in the Malt and Shinar study [48], Bueno et al. [20] analysed the reliability level of an FCWS (100% or 70% reliable) in drivers distracted by a secondary cognitive task but they also analysed this in undistracted drivers. Behavioural data showed that reliable and unreliable systems only reduced RT when drivers were undistracted but not when they were distracted. However, the analysis of the electrical activity of the brain revealed a slightly different pattern of results. ERP data showed a reduction in the amplitude and the latency of the N2 by the reliable system in simple task condition; whereas the unreliable system reduced the latency of the P3 in dual task condition. These results could be interpreted as an increase of the expectancy of the target in the first case and a diminution of the time required for processing the

target at higher cognitive level, in the second case. In parallel to Maltz and Shinar's study [48] but with all due caution, it could be speculated that less reliable systems are more effective than more reliable systems in dual task situations. Nevertheless, further research is needed to shed light on these phenomena.

As it has been discussed here, the cut-off between a reliable and an unreliable system does not seem to be determined exclusively by the characteristics of the system (level of reliability, type of warning signal, etc.) but also by some driver characteristics such as the attentional state.

12.6 Behavioural adaptation to the system

The last factor addressed in this chapter is the behavioural adaptation defined as "those behaviours which may occur following the introduction of changes to the road-vehicle-user system and which were not intended by the initiators of the change (p.23)" [49]. Given its repercussion for road safety, the behavioural adaptation to the assistance system has a market negative connotation, although a wider vision could be adopted by considering all relevant changes associated to the introduction of the assistance system [50].

To our knowledge, there are no studies evaluating the behavioural adaptation to the FCWS using ERP data; therefore, only behavioural studies will be considered in this section.

As previously discussed, the introduction of an FCWS can produce different effects on drivers' behaviour. Some of them are positive, such as faster reaction times and the reduction of collisions. However, undesirable behavioural changes can also appear, sometimes as a consequence of the interaction with other factors such as the attentional state of the driver or the reliability level of the system. For example, drivers could engage in more secondary tasks or even assume more risky behaviours by delegating the danger monitoring task to the system (compensatory effects). This could have unintended consequences such as an increase in the brake reaction time in the case of a real collision or in the case of the system failing to warn drivers. Concerning the failures of the system, false alerts could increase the driving speed and reaction times and a reduced miss rate could lead to over-relying on the system.

In general, FCWS have been analysed in short-term studies and, in most of the cases, the effect of introducing the system could not have been assessed in experimental studies because the order effects were eliminated by the counterbalancing. Therefore, at present it is not fully understood how drivers adapt their behaviour to the system in the first-time uses (learning and appropriation phase), nor after a prolonged use during a long period of time (integration phase) [51]. Moreover, other factors could have an influence on the adaptation to the system, such as traffic conditions, driver characteristics and some attitudes and personality traits like driving style, sensation seeking, and the locus of control (internal or external responsibility attribution for the outcome of events). Jamson et al. [51] conducted a driver simulator study to analyse the benefits of an FCWS taking into account the

driver style, with higher or lower sensation seekers. Their results showed a positive effect of the system compared to the baseline; however, the driver style had little or no impact.

To our knowledge, only one study has been carried out showing the behavioural effect of an FCWS in the long term in a field operation test [10]. In this study, participants had to drive in real traffic conditions with the system (2nd trial) and without it (1st and 3rd trials, and 4th trial six months later). Safer time headway was observed immediately after exposure to the system (3rd trial). Interestingly, this effect was also observed six months later when participants were exposed again to the same drive without the warning assistance. We have also analysed the behavioural effect of an FCWS in the short term in a driving simulator study. Participants were required to drive without the system during the first session (baseline). Then, the system was introduced in the second, third, and fourth sessions in order to evaluate the immediate effect of introducing an FCWS and the behavioural adaptation to the system in the short term. Finally, participants drove without the system during the fifth session to analyse the consequences of switching off the system after a short period of habituation. The results showed that the introduction of the system drastically reduced the reaction time during the second session compared with the control group who drove without any assistance. During the integration phase (sessions two and three), reaction times were also faster for the system group than for the control group. Finally, results showed longer reaction times during the last session (with the system switched off), with an increase especially noticeable for the system groups. This last result may provide evidence for the disruptive effect of driving without the warning system, for example, by a system breakdown, once the driver is accustomed to driving with the system. Nevertheless, the control group showed a progressive increment of the reaction time along the five sessions which could be interpreted as a practice and/or fatigue effect. Therefore, it was not possible to conclude whether the longer reaction times for the system groups were completely explained by the absence of the system. As there are not many studies in this respect, further research would be necessary to investigate the effects of driving with or without the system after the integration phase.

Although the number of studies and the situations evaluated are not sufficient to draw final conclusions, it is interesting to observe that among these studies no negative behavioural adaptation effects were evidenced. It could be possible that compensatory effects when driving with an FCWS are more difficult to reproduce than when driving with other systems. Rear-end collisions are relatively infrequent situations compared to, for example, monitoring excessive speed or lane departure. Moreover, given the safety risk involved in these collisions, it could be more difficult for drivers to rely completely on the system. Certainly the reliability level can have a strong impact on the behavioural adaptation to the system. However it has been demonstrated that unreliable systems can also be useful in terms of assistance for drivers.

Psychology of learning could enable interpretation of why unreliable systems can be effective. The association between the warning (stimulus 1) and the hazard (stimulus 2) is produced in very different contexts (i.e. high traffic flow, good or bad weather conditions, secondary tasks, etc.). Moreover, drivers learn that the causal relation between the two stimuli is not perfect. Indeed, as discussed

earlier, the perfect system does not exist. Therefore, the presence of false alerts and misses produces an intermittent reinforcement of the warning and, consequently, more resistance to extinction [52]. Nevertheless, given the limited number of studies in this regard, further research would be necessary in order to determine the positive and negative effects of FCWS used in the short and long term.

12.7 Conclusions

This chapter aimed at reviewing literature assessing the effectiveness of FCWS. Although it has been shown that the system provides potential benefits for road safety, certain factors such as the attentional state of drivers and the reliability level of the system can mitigate its effectiveness. Further research seems necessary to clarify whether the system helps distracted drivers by manipulating the difficulty level of the secondary tasks and the type of warnings. If, as it has been hypothesised here, the processing of the warning information is not an automated task and needs some attentional resources, it is possible that a training program could optimise drivers' performance when driving with the system.

The reliability of the system is likely to be one of the most critical factors for the acceptance of the system by drivers. Although failures of the system can have a positive impact for road safety, it is necessary to find a good balance to avoid drivers deciding not to use it. Probably one of the most negative effects of behavioural adaptation could be over-reliance. The studies presented in this chapter did not show evidence of this phenomenon in drivers; however, currently there are only a few studies and, therefore, more research assessing behavioural adaptation after short and long-term use needs to be conducted.

Finally, ERP studies have shown to be promising in the analysis of the effectiveness of FCWS. Until now, FCWS had been mainly studied by recording measures of driver performance and, eventually, by analysing the visual behaviour of drivers. The ERP technique permits to elucidation and dissociation of the different stages of the information processing, some of which are not observable in open behaviour. Thus, the results showed in the studies presented above revealed that the warning signal could operate at preparatory (CNV) and higher cognitive stages (P3).

Throughout this chapter, it has been shown that the effectiveness of the FCWS and its acceptance by drivers depend on numerous factors. On the one hand, factors that directly affect the effectiveness of the system can come from the system itself. For instance, the moment for triggering the warning, the reliability level of the system or the modality of the warning (visual, auditory) are critical elements to take into consideration. But even the "best" of the systems in terms of technical parameters could not be appropriated for certain drivers. It has been demonstrated that the effectiveness of the system could vary according to the attentional state of the driver. The different driving style, age, experience or health status of drivers should also be considered in order to insure that specific populations, for example, older drivers, could benefit as expected from these systems. Moreover, one of the issues evidenced in some of the studies above presented has been the large inter-individual variability

observed among the same type of drivers. Therefore, we strongly recommend developing adaptive FCWS which take such characteristics into account.

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement n°238833/ ADAPTATION project. www.adaptation-itn.eu

References

- 1 'Regulation (EC) No 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, their trailers and systems, components and separate technical units intended therefor'. 2009
- 2 United Nations. *Statistics of road traffic accidents in Europe and North America*. Geneva, 2007
- 3 Knipling R.R., Wang J.S., Yin H.M. *Rear-end Crashes: Problem size assessment and statistical description*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 807-994, 1993
- 4 Vogel L., Bester C.J. 'A relationship between accident types and causes'. *24th Southern African Transport Conference*; South Africa, 2005
- 5 Bella F, Russo R. A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2011;**20**(0):676-86
- 6 Breuer J.J., Faulhaber, A., Frank, P., Gleissner, S. 'Real world safety benefits of brake assistance systems'. *20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*; Lyon, 2007
- 7 Najm W.G., Stearns M.D., Howarth H., Koopmann J., Hitz J. 'Evaluation of an automotive rear end collision avoidance system'. Cambridge: National Highway Traffic Safety Administration. 2006
- 8 Lee J.D., McGehee D.V., Brown T.L., Reyes M.L. 'Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2002;**44**(2):314-34
- 9 Abe G., Richardson J. 'Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems'. *Applied Ergonomics*. 2006;**37**(5):577-86
- 10 Ben-Yaacov A., Maltz M., Shinar D. 'Effects of an In-Vehicle Collision Avoidance Warning System on Short- and Long-Term Driving Performance'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2002;**44**(2):335-42
- 11 Georgi A., Zimmermann, M., Lich, T., Blank, L., Kickler, N., Marchthaler, R. 'New approach of accident benefit analysis for rear end collision avoidance and mitigation systems'. *21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*; Germany, 2009
- 12 Anderson R.W.G., Doecke S.D., Mackenzie J.R.R., Ponte G., Paine D., Paine M. *Potential benefits of forward collision avoidance technology*. South Australia: Centre for Automotive Safety Research, CASR0106, 2012

- 13 Loveless N.E. 'The contingent negative variation related to preparatory set in a reaction time situation with variable foreperiod'. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1973;**35**(4):369-74
- 14 Vogel E.K., Luck S.J. 'The visual N1 component as an index of a discrimination process'. *Psychophysiology*. 2000;**37**(2):190-203
- 15 Folstein J.R., Van Petten C. 'Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review'. *Psychophysiology*. 2008;**45**(1):152-70
- 16 Polich J. 'Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b'. *Clinical Neurophysiology*. 2007;**118**(10):2128-48
- 17 Kok A. 'On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity'. *Psychophysiology*. 2001;**38**(3):557-77
- 18 Strayer D.L., Drews F.A. 'Multi-tasking in the automobile' in Kramer A, Wiegmann D, Kirlik A. (eds.). *Applied Attention: From Theory to Practice*. New York: Oxford University Press; 2007. pp. 121-33
- 19 Rakauskas M.E., Ward N.J., Bernat E.M., Cadwallader M., Patrick C.J., de Waard D. 'Psychophysiological measures of driver distraction and workload while intoxicated'. *3rd International Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*; Rockport, Maine, 2005
- 20 Bueno M., Fabrigoule C., Deleurence P., Ndiaye D., Fort A. 'An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task'. *Brain Research*. 2012;**1470**:69-79
- 21 Regan M.A., Hallett C., Gordon G.P. 'Driver distraction and driver inattention: Definition, relationship and taxonomy'. *Accident Analysis and Prevention*. 2011;**43**:1771-1781
- 22 Engström J., Johansson E., Östlund J. 'Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving'. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2005;**8**(2):97-120
- 23 Kaber D.B., Liang Y., Zhang Y., Rogers M.L., Gangakhedkar S. 'Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior'. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2012;**15**(5):491-501
- 24 Kramer A.F., Cassavaugh N., Horrey W.J., Becic E., Mayhugh J.L. 'Influence of Age and Proximity Warning Devices on Collision Avoidance in Simulated Driving'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2007;**49**(5):935-49
- 25 Abe G., Itoh M., Yamamura T. 'Visual distraction when driving and its influence on driver response to a forward collision warning system'. *SICE Annual Conference 2011*; Tokyo, Japan, 2011
- 26 Ho C., Spence C. 'Using peripersonal warning signals to orient a driver's gaze'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2009;**51**(4):539-56
- 27 Bueno M., Fort A., Francois M., Ndiaye D., Deleurence P., Fabrigoule C. 'Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective'. *Neuroscience Letters*. 2013;**541**:219-23
- 28 Hackley S.A., Valle-Inclán F. 'Which stages of processing are speeded by a warning signal?'. *Biological Psychology*. 2003;**64**(1-2):27-45

- 29 Rudell A.P., Hu B. 'Does a warning signal accelerate the processing of sensory information? Evidence from recognition potential responses to high and low frequency words'. *International Journal of Psychophysiology*. 2001;**41**(1):31-42
- 30 Wickens C. 'The structure of attentional resources' in Nickerson R. (ed.). *Attention and performance*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum; 1980. pp. 239-57
- 31 Mohebbi R., Gray R., Tan H.Z. 'Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2009;**51**(1):102-10
- 32 Ho C., Reed N., Spence C. 'Multisensory In-Car Warning Signals for Collision Avoidance'. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2007;**49**(6):1107-14
- 33 Santangelo V., Van der Lubbe R., Olivetti Belardinelli M., Postma A. 'Multisensory integration affects ERP components elicited by exogenous cues'. *Experimental Brain Research*. 2008;**185**(2):269-77
- 34 Baddeley A.D. 'Exploring the central executive'. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 1996;**49A**(1):5-28
- 35 Campbell J.L., Richard C.M., Brown J.L., McCallum M. *Crash Warning System Interfaces: Human Factors Insights and Lessons Learned* Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration, 2007
- 36 Lees M. Context conditions drivers' disposition towards alarms. PhD thesis. Iowa: University of Iowa; 2010
- 37 McLaughlin S.B. Analytic Assessment of Collision Avoidance Systems and Driver Dynamic Performance in Rear-End Crashes and Near-Crashes Virginia Virginia Polytechnic Institute and State University; 2007
- 38 Kiefer R.J., LeBlanc D., Palmer M., Salinger J., Deering R., Shulman M. *Forward Collision Warning Systems: Development and Validation of Functional Definitions and Evaluation Procedures for Collision Warning/Avoidance Systems*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 808-964, 1999
- 39 Maltz M., Shinar D. 'Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers'. *Human Factors*. 2004;**46**(2):357-66
- 40 Lerner N.D., Dekker D.K., Steinberg G.V., Huey R.W. *Inappropriate Alarm Rates and Driver Annoyance*. Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 808-533, 1996
- 41 Abe G., Itoh M., Tanaka K. 'Dynamics of drivers' trust in warning systems'. *15th IFAC World Congress*; Barcelona, Spain, 2002
- 42 Cotté N., Meyer J., Coughlin J.F. 'Older and Younger Drivers' Reliance on Collision Warning Systems'. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*. 2001;**45**:277-80
- 43 Yamada K., Kuchar J.K. 'Preliminary study of behavioral and safety effects of driver dependence on a warning system in a driving simulator'. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*. 2006;**36**(3):602-10

- 44 Abe G., Richardson J. 'The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing'. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2004;**7**(4-5):307-22
- 45 Parasuraman R., Hancock P.A., Olofinboba O. 'Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems'. *Ergonomics*. 1997;**40**(3):390-99
- 46 Bliss J.P., Acton S.A. 'Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving'. *Applied Ergonomics*. 2003;**34**(6):499-509
- 47 Wickens C.D., Dixon S.R. 'The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature'. *TTIE*. 2007;**8**(3):201-12
- 48 Maltz M., Shinar D. 'Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid distracted drivers'. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2007;**10**(4):345-57
- 49 OECD. *Behavioural adaptations to changes in the road transport system*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1990
- 50 Saad F., Hjälm Dahl M., Cañas J., Alonso M., Garayo P., Macchi L., et al. *Literature review of behavioural effects*. Brussels: Information Society Technologies, 2004
- 51 Jamson A.H., Lai F.C.H., Carsten O.M.J. 'Potential benefits of an adaptive forward collision warning system'. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2008;**16**(4):471-84
- 52 Mackintosh N.J. *The psychology of animal learning*. New York: Academic Press; 1974

ANNEXE 2

Annexe 2 : Liste de publications

ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES

- Bueno, M., Fabrigoule, C., Ndiaye, D., and Fort, A. (soumis). Behavioural adaptation to a Forward Collision Warning System: learning and distraction effects. A soumettre à *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*
- Bueno, M., Fort, A., Francois, M., Ndiaye, D., Deleurence, P., and Fabrigoule, C. (2013). Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and dual task from an electrophysiological perspective. *Neuroscience Letters*, 541, 219-223
- Fort, A., Collette, B., Bueno, M., Deleurence, P., and Bonnard, A. (2013). Impact of totally and partially predictive alert in distracted and undistracted subjects: An event related potential study. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 578-586.
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., and Fort, A. (2012). An electrophysiological study of the impact of a Forward Collision Warning System in a simulator driving task. *Brain Research*, 1470, 69-79

OUVRAGES SCIENTIFIQUES

- Bueno, M., Fabrigoule, C., and Fort, A. (2014). Effectiveness of Forward Collision Warning System: a contribution from the cognitive analysis combining behavioural and electrophysiological measure. In A Stevens, C Brusque & J Krems (Eds). *Driver adaptation to information and assistance systems*. IET published book. ISBN: 978-1-84919-639-0; E-ISBN: 978-1-84919-640-6
- Huth, V., Bueno, M., Fort, A., and Brusque, C. (2014). Synthesis of new knowledge on driver's adaptation processes in response to ADAS issued from the ADAPTATION project. In A Stevens, C Brusque & J Krems (Eds). *Driver adaptation to information and assistance systems*. IET published book. ISBN: 978-1-84919-639-0; E-ISBN: 978-1-84919-640-6

COMMUNICATIONS AVEC ACTES DANS UN CONGRES INTERNATIONAL

Bueno, M., Fort, A., Deleurence, P., Ndiaye, D., and Fabrigoule, C. (2012). Evaluation of a surrogate Forward Collision Warning System in an electrophysiological perspective. In: Valero, P., Pace, J.P., Mendoza, L. (eds.) *Proceeding of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, pp. 267-273. Humanist Publications

COMMUNICATIONS SANS ACTES DANS UN CONGRES INTERNATIONAL

Bueno, M., Fort, A., Ndiaye, D., Deleurence, P., Francois, M., and Fabrigoule, C. Effect of Forward Collision Warning System on information processing: Electrophysiological approach. 5th *International Conference on Traffic and Transport Psychology (ICTTP)*, Groningen (The Netherlands), August, 29-31, 2012

Bueno, M., Fort, A., Collette, B., Deleurence, P., Bonnard, A., and Fabrigoule, C. Impact of simulated Forward Collision Warning System while driving: an event related potential study. 2nd *International Conference on Driver Distraction and Inattention*, Göteborg, September, 5-7, 2011

IMPACT D'UN SYSTEME ANTICOLLISION SUR LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET LE COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR

Ce travail de thèse a été centré sur l'analyse de l'impact d'un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information et le comportement du conducteur en conduite automobile simulée. Les objectifs de ce travail étaient 1) de déterminer l'impact d'un signal avertisseur associé à un système d'alerte anticollision sur le traitement de l'information à partir de potentiels évoqués ; 2) d'analyser l'efficacité d'un tel système en fonction de sa fiabilité ; 3) et en fonction de l'état attentionnel des conducteurs ; et 4) d'examiner l'adaptation comportementale au système au cours du temps.

Grâce à une double approche comportementale et électrophysiologique, nous avons montré que le signal avertisseur agit au niveau de l'anticipation et de la préparation à la réponse ainsi qu'au niveau cognitif du traitement de l'information. Par ailleurs, nous avons confirmé que les systèmes anticollision ne nécessitent pas d'être complètement fiables pour être efficaces. Nous avons également observé que l'efficacité du signal avertisseur associé au système anticollision était moindre chez les sujets distraits, notamment lorsque la charge cognitive associée à la distraction était élevée. Ceci suggère que le signal avertisseur nécessite des ressources attentionnelles pour être traité et, donc, pour être efficace. Concernant l'adaptation comportementale au système, les principaux résultats ont montré, d'une part, que l'introduction immédiate du système a eu un effet positif sur le comportement de conduite et, d'autre part, que le processus d'adaptation au système à plus long terme peut être affecté si les conducteurs sont distraits par des tâches secondaires coûteuses en ressources attentionnelles.

Mots clés :

Signal avertisseur, conduite simulée, traitement de l'information, potentiels évoqués, fiabilité, distraction, adaptation comportementale.