

Utilisation des simulateurs de conduite pour l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite en situation d'urgence

Arnaud Mas

▶ **To cite this version:**

Arnaud Mas. Utilisation des simulateurs de conduite pour l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite en situation d'urgence. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Arts et Métiers ParisTech, 2012. Français. NNT : 2012ENAM0021 . pastel-00714217

HAL Id: pastel-00714217
https://pastel.hal.science/pastel-00714217

Submitted on 3 Jul 2012

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.



ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

2012-ENAM-0021

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Informatique – traitement du signal "

présentée et soutenue publiquement par

Arnaud MAS

le 28 juin 2012

Utilisation des simulateurs de conduite pour l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite en situation d'urgence

Directeur de thèse : **Frédéric MERIENNE**
Co-encadrement de la thèse : **Andras KEMENY**

Jury

M. Jean-Christophe POPIEUL, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes	Rapporteur
M. Stéphane ESPIE, Directeur de recherche, IFSTTAR	Rapporteur
M. Daniel MESTRE, Directeur de recherche, Institut des Sciences du Mouvement	Examinateur
M. Jean-Marc BLOSSEVILLE, Docteur, IFSTTAR	Examinateur
M. Andras KEMENY, Professeur associé, Renault, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Frédéric MERIENNE, Professeur, Le2i, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Centre de Cluny
Le2i – UMR CNRS 5158

A ma grand-mère Gillette.
A Rémi.

Remerciements

Une thèse est une aventure semée d'embûches, et il m'aurait été impossible d'en venir à bout tout seul. L'exercice des remerciements s'impose donc, en espérant n'oublier personne.

Merci à mes directeurs de thèse pour m'avoir permis de réaliser ce travail. Andras Kemeny, pour m'avoir accueilli au sein du Centre Technique de Simulation de Renault, m'avoir fait découvrir l'entreprise tout en me laissant une certaine liberté. Frédéric Mérienne, pour m'avoir accueilli au sein de l'Institut Image du Le2i, et m'avoir suivi malgré la distance.

Merci aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail, Daniel Mestre, Jean-Marc Blosseville, et en particulier Stéphane Espié et Jean-Christophe Popieul pour avoir accepté le travail de rapporteur.

Merci à mes collègues du Centre Technique de Simulation (internes, prestataires et intérimaires), qui m'ont apporté quotidiennement une aide et une bonne humeur inestimables. Je remercie en particulier le club des thésards avec qui j'ai pu avoir des échanges extrêmement enrichissants, mais aussi très amicaux : Thomas, Nicolas, Renaud, Emmanuelle, Slim, Adrien, Benjamin et Benoît. Merci aux collègues d'Oktal qui m'ont apporté une aide précieuse : Julien, David, Thomas, Yohann. Merci à Arnaud Koustanaï et Viola Cavallo avec qui j'ai eu la chance de travailler sur le projet MATISS.

Merci à l'équipe de l'Institut Image qui a su me réserver un accueil chaleureux malgré la faible fréquence de mes visites : Florent, Géraldine, Baris, Vladimir, Manu et Choco.

Merci à ma famille, qui m'a soutenu et encouragé tout au long de ce travail : ma sœur et mes parents (merci à ma mère qui a eu la patience de me relire). Merci à Michèle et Gabriel d'être venus me supporter pour ma soutenance.

Merci à mes amis qui ont su rendre ces trois ans plus agréables : Marion, Elodie, Clarisse, Nénelle, Julien, Marion, Thorfin, Ded, Alex, Chacha, Vince, Mathias, Hélène, FX, Dédé, Lolo, Oréline, Thibaut, Catherine, Juan, Hélène, Loïc, Ariane, Charles, Carole, Olivier, Léa, Thomas, Arnaud, Axelle, Giorgio, Fabien, Déborah, Sabrina, Aurélien, Cristina, MBK, Sylvain, Antoine.

Merci à toutes les personnes salariées de Renault qui se sont portées volontaires pour mes expé-

rimentations en prenant sur leur temps de travail.

Merci enfin à Jean-Michel Hisboé, Serge Forté et Adolphe Sax pour m'avoir permis d'exercer ma passion.

“ Je ne veux pas [...] te supplier presque les larmes aux yeux comme les autres font, lecteur très cher, de pardonner ou de négliger les défauts que tu verras à mon enfant, car tu n'es ni son parent ni son ami, et tu as ton âme dans ton corps et ton libre arbitre tout comme le plus malin, et tu es dans ta propre maison où tu es le maître, comme le roi l'est de ses impôts, et tu sais ce qu'on dit communément, que pas vu et chez moi, je tue même le roi. ”

Miguel de Cervantès. *Don Quichotte* (Prologue). 1605.

Résumé

La technologie automobile actuelle tend à intégrer des systèmes d'aide à la conduite de plus en plus nombreux dans les véhicules. L'introduction de ces systèmes a de nombreuses conséquences, d'une part sur le comportement des véhicules, et d'autre part sur l'interaction entre les conducteurs et leur véhicule. Notamment, la modification du comportement de conduite n'entraîne pas toujours le gain recherché, qu'il soit de confort ou de sécurité. Il est donc primordial d'étudier la manière dont les systèmes d'aide à la conduite influent sur le comportement des conducteurs, et par conséquent sur la sécurité routière.

Pour étudier ces phénomènes, les simulateurs de conduite présentent une alternative sûre et peu coûteuse. Ce travail doctoral porte donc essentiellement sur des études expérimentales menées sur des simulateurs de conduite avec des panels de conducteurs et différents systèmes d'aide, afin de répondre à plusieurs objectifs. Premièrement, il vise à implémenter des prototypes de systèmes d'aide à la conduite sur simulateur de conduite. Deuxièmement, à proposer des méthodes de mesure et d'analyse des phénomènes comportementaux mis en jeux. Troisièmement, à discuter de la pertinence et de la validité des simulateurs de conduite pour ce genre d'études. En particulier, le cas des situations d'urgence, en dehors du domaine de validité des systèmes d'aide à la conduite, est étudié.

Dans cette optique, trois expérimentations ont été réalisées sur simulateur de conduite. La première expérimentation, réalisée en collaboration avec l'IFSTTAR dans le cadre du projet européen MATISS, porte sur le rôle de la familiarisation sur un simulateur de conduite avec un système d'aide au contrôle longitudinal, le Forward Collision Warning (FCW), et son influence sur le comportement des conducteurs. Les résultats montrent qu'après une familiarisation avec le système d'aide sur un simulateur de conduite, les conducteurs ont adopté une conduite plus sûre, et ont réussi à éviter un obstacle lors d'une situation de freinage d'urgence.

Les deux autres expérimentations utilisent deux systèmes d'aide au contrôle latéral, le Lane Departure Warning (LDW) et le Lane Keeping Assistant (LKA). Après une phase de familiarisation avec le système d'aide, les conducteurs étaient soumis à une situation d'urgence d'évitement d'obstacle. Ces expérimentations ont été réalisées sur simulateur statique (*i.e.* sans restitution de mouvements) et dynamique (*i.e.* avec restitution de mouvements). Dans les deux cas, les résultats confirment l'efficacité des systèmes d'aide sur le contrôle latéral des conducteurs, principalement

en virage.

Sur simulateur statique, les résultats montrent que les conducteurs, avec ou sans système d'aide, ont réussi relativement aisément à éviter l'obstacle. En revanche, une analyse plus détaillée de la manœuvre d'évitement montre une différence dans la réaction des conducteurs avec système d'aide, suggérant d'éventuelles difficultés pour garder le contrôle du véhicule dans le cas de situations plus critiques.

Sur simulateur dynamique, les conducteurs ont également réussi aisément a éviter l'obstacle, avec ou sans système d'aide. Mais, bien que la situation d'urgence ait été plus critique dans cette dernière expérimentation, les résultats n'ont pas confirmé de difficulté à garder le contrôle du véhicule en présence de système d'aide. Les résultats des deux expérimentations ont donc été comparés par la suite, afin de discuter de l'intérêt de la restitution de mouvements pour ce type d'études. Cette mise en parallèle a souligné l'intérêt de la restitution de mouvements, notamment grâce aux accélérations latérales qui fournissent aux conducteurs un indice primordial lors d'une situation d'urgence. La restitution de mouvements apparaît ainsi indispensable pour des études rigoureuses sur le comportement des conducteurs en présence de systèmes d'aide à la conduite.

Contexte

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un contrat CIFRE (contrat ANRT n° 2008/918) entre Renault S.A.S. (Centre Technique de Simulation) et le Laboratoire Electronique, Informatique et Image (Le2i), UMR 5158 CNRS - Arts et Métiers ParisTech, sous la co-direction d'Andras Kemeny (Renault S.A.S.) et de Frédéric Merienne (Le2i).

Une partie de ces travaux a également été menée dans le cadre du projet de recherche européen MATISS (Modélisation Avancée, Techniques Interactives de Simulation pour la Sécurité), qui a pour objectif l'étude des méthodologies d'utilisation des simulateurs de conduite pour les études avancées de sécurité routière, en particulier concernant les situations critiques d'usage des systèmes d'assistance à la conduite. Le consortium de ce projet réunit Renault S.A.S. (Centre Technique de Simulation et Département Ergonomie/IHM), OKTAL S.A, ainsi que les laboratoires LPC (IFSTTAR) et LPPA (Collège de France - CNRS).

Table des matières

Remerciements **iii**

Résumé **vii**

1 Introduction générale **1**

1.1 Les systèmes d'aide à la conduite 1

1.2 Problématique 2

1.3 Contexte 3

1.4 Plan de lecture 4

I Revue bibliographique **7**

2 Le conducteur **9**

2.1 Modalités sensorielles 9

2.2 L'activité de conduite 16

2.3 Modèles opérationnels 18

2.4 Le cas particulier de l'évitement d'obstacle 22

2.5 Les théories du risque 24

3 Les systèmes d'aide à la conduite **31**

3.1 Technologie 31
3.2 La coopération Homme / machine 35

4 La simulation de conduite **45**

4.1 Presentation 45
4.2 Les simulateurs de conduite dans le monde 49
4.3 Les simulateurs de conduite du CTS 54
4.4 Le simulateur de conduite du Le2i 58
4.5 Validité des simulateurs 59

II Partie expérimentale 1 : Assistance au contrôle longitudinal **65**

5 Familiarisation avec un système Forward Collision Warning **67**

5.1 Introduction 67
5.2 Méthode 69
5.3 Analyse de données 73
5.4 Résultats 73
5.5 Discussion 76
5.6 Conclusion 77

III Partie expérimentale 2 : Assistance au contrôle latéral **79**

6 Modélisation de systèmes d'aide au contrôle latéral **81**

6.1 Introduction 81
6.2 Principe général 81
6.3 Lane Departure Warning 82

6.4 Lane Keeping Assistant 83

7 Assistance au contrôle latéral et situation d'urgence : expérience sur simulateur statique 87

7.1 Introduction 87

7.2 Méthode 89

7.3 Analyse de données 92

7.4 Résultats 100

7.5 Discussion 109

7.6 Conclusion 113

8 Assistance au contrôle latéral et situation d'urgence : expérience sur simulateur dynamique 115

8.1 Introduction 115

8.2 Méthode 116

8.3 Analyse de données 118

8.4 Résultats 122

8.5 Discussion 132

8.6 Conclusion 133

9 Influence de la restitution de mouvements 135

9.1 Introduction 135

9.2 Analyse de données 136

9.3 Résultats 137

9.4 Discussion 144

9.5 Conclusion 147

IV Conclusion générale et bibliographie **149**

10 Conclusion générale **151**

10.1 Synthèse des résultats 151

10.2 Perspectives 152

Bibliographie **155**

Annexes **169**

A Articles publiés **171**

A.1 Koustanaï, A., Mas, A., Cavallo, V., et Delhomme, P. (2010). Familiarization with a forward collision warning on driving simulator : cost and benefice on driver-system interactions and trust. *Proceedings of Driving Simulation Conference*, pp. 169-179. 171

A.2 Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2010). Familiarization with critical situations when using a forward collision warning : effects on driver-system interactions. *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, pp. 37-47. 183

A.3 Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2012, sous presse). Simulator training with a Forward Collision Warning system : effects on driver/system interactions and driver trust. *Human Factors*. 195

A.4 Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, IN. 209

A.5 Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in Transportation Studies* RSS2011 Special Issue, 149-158. 222

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Les systèmes d'aide à la conduite

Le développement de la technologie automobile actuelle prévoit l'intégration de systèmes de sécurité de plus en plus nombreux, et de plus en plus complexes. Ces systèmes de sécurité peuvent être répartis en deux grandes catégories : les systèmes passifs, visant à minimiser la gravité d'un accident (comme les ceintures de sécurité, les airbags, etc), et les systèmes actifs, visant à minimiser les risques d'occurrence d'un accident. Les systèmes d'aide à la conduite rentrent dans cette dernière catégorie. Ces systèmes sont conçus pour améliorer la sécurité de conduite en réduisant pour cela le risque d'erreur humaine. Ils peuvent agir de différentes façons, que ce soit en donnant au conducteur des informations supplémentaires sur l'état de l'environnement (via une interface de communication multi-modale : sonore, visuelle, tactile, etc), ou en l'assistant dans sa tâche de conduite. On parle dans ce dernier cas de *coopération Homme / machine*.

Toutefois, pour une réelle efficacité des systèmes d'aide à la conduite, il apparaît nécessaire que les conducteurs comprennent leur fonctionnement, et qu'ils les utilisent correctement. Il est donc primordial pour un constructeur automobile, lors de la conception de ces systèmes, de s'intéresser au comportement des conducteurs induit par leur déclenchement. Avec le développement des systèmes d'aide à la conduite dans nos véhicules, il est en effet facile d'imaginer les conséquences malheureuses que pourrait avoir une mauvaise interaction entre les conducteurs et les systèmes. L'exemple de l'ABS est assez parlant. Ce système vise à minimiser les risques de pertes de contrôle du véhicule en empêchant le blocage des roues lors du freinage. Mais, lors de son déclenchement provocant une forte vibration de la pédale de frein, certains conducteurs, surpris par cette sensation inhabituelle, ont instinctivement relâché le pied de la pédale de frein. Ceci reste cependant un exemple extrême, montrant une réaction de conducteurs ayant contré l'action bénéfique du système d'aide à la conduite.

Plus généralement, les conducteurs peuvent se trouver confrontés à des situations critiques

d'usage. En effet, si les systèmes d'aide à la conduite ont pour objectif d'améliorer les capacités des conducteurs (que ce soient leurs capacités de contrôle ou de perception), dans le but d'améliorer la sécurité de la conduite, il est important de noter que le gain de sécurité réel apporté par les systèmes d'aide à la conduite ne correspond pas toujours à celui escompté. Il est en effet menacé par des situations critiques pouvant impacter l'interaction entre les conducteurs et les systèmes d'aide. On peut distinguer en particulier les cas de défaillance des systèmes d'aide à la conduite (panne ou mode dégradé), ou les cas de situations d'urgence non prises en compte par les systèmes d'aide à la conduite.

Ces cas d'étude ne se prêtent pas à des expérimentations sur route ouverte ou sur piste. Tout d'abord pour des raisons évidentes de sécurité, car de telles études nécessiteraient de mettre des conducteurs dans des situations dangereuses, voire même mortelles. Mais également pour des contraintes techniques, qui obligeraient à équiper un véhicule expérimental avec tout le matériel de mesure nécessaire (procédure lente et coûteuse, et soumise à la limitation physique des instruments de mesure). Enfin, les expérimentations sur route réelle limitent également le contrôle des conditions expérimentales (conditions météo, de trafic, etc).

Les simulateurs de conduite présentent donc une alternative particulièrement adaptée pour ce type d'études, en laissant à l'expérimentateur une plus grande liberté pour le plan d'expérience (ils permettent notamment de créer des scénarios exagérant la réalité) et en permettant une reproductibilité totale des situations expérimentales. De plus, pour le cas plus particulier des systèmes d'aide à la conduite, l'utilisation de modèles de véhicules purement virtuels facilite grandement le développement et l'intégration de nouveaux modèles de systèmes en phase amont d'un projet.

1.2 Problématique

La conduite est une tâche complexe, intégrant de nombreux mécanismes cognitifs et moteurs requérant de l'expérience, et généralement effectués de façon routinière. Lors de la conduite avec un système d'aide à la conduite, le conducteur s'adapte et modifie, souvent inconsciemment, ces mécanismes. De plus, les systèmes d'aide à la conduite peuvent agir de différentes façons, selon plusieurs niveaux d'automatisation, c'est-à-dire un degré plus ou moins élevé d'intervention dans le contrôle du véhicule. Ils peuvent ainsi être informatifs, fournissant au conducteur des données sur l'état de l'environnement, ou participer activement à la tâche de conduite, en coopération avec le conducteur ou en le suppléant totalement. L'influence des systèmes d'aide à la conduite sur le comportement des conducteurs est donc directement dépendante du niveau d'automatisation.

En regard de ce constat, l'objectif de ce travail doctoral est multiple. Premièrement, il vise à implémenter des prototypes de systèmes d'aide à la conduite sur simulateur de conduite, illustrant différents niveaux d'automatisation. Deuxièmement, à proposer des méthodes de mesure et d'analyse des phénomènes comportementaux mis en jeux. Troisièmement, à discuter de la pertinence et de la validité des simulateurs de conduite pour ce genre d'études.

L'approche qui a été choisie, plutôt que d'étudier la tâche de conduite dans sa globalité, est de se focaliser principalement sur les cas les plus critiques du point de vue de la sécurité : les situations d'urgence. En effet, les systèmes d'aide à la conduite sont conçus pour assister le conducteur pour une tâche bien précise, comme le contrôle longitudinal (gestion de la vitesse) ou latéral (gestion de la position du véhicule dans la voie), et ce dans un cadre bien précis (conduite sur autoroute, détection d'obstacles, etc). Ainsi, il est primordial pour les conducteurs utilisant un système d'aide d'en identifier le domaine de fonctionnement, ainsi que ses limites, et de réagir de façon adéquate dans une situation en-dehors de ce domaine. Ce type de réaction constitue l'objet principal des études expérimentales présentées dans cette thèse.

Ce travail tente donc de répondre aux questions suivantes :
- L'adaptation des conducteurs à un système d'aide à la conduite a-t-elle bien lieu sur un simulateur de conduite comme en conduite réelle ? Certains effets négatifs peuvent-ils en être dégagés ?
- Lors d'une situation d'urgence, les conducteurs réagissent-ils de la même façon en présence d'un système d'aide à la conduite que sans ? L'adaptation au système d'aide peut-elle dans ce cas-là avoir un impact négatif sur la sécurité ?
- Les simulateurs de conduite immergent-ils suffisamment les conducteurs pour observer une réelle réaction d'urgence ? En particulier, quel est l'apport de la restitution de mouvements pour ces études ?

Pour répondre à ces questions, ce travail de recherche s'articule autour d'études expérimentales menées sur des panels de conducteurs.

1.3 Contexte

1.3.1 Le laboratoire Le2i

Le Le2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image) est une unité mixte de recherche de l'université de Bourgogne et d'Arts et Métiers ParisTech. Ce laboratoire est composé de 130 personnes, réparties sur différents sites dans la région bourguignonne.

Cette thèse a été réalisée sous la direction de Frédéric Mérienne, au sein de l'équipe de recherche Image, dirigée par Marc Neveu, située à l'Institut Image de Chalon-sur-Saône. Les thématiques de recherche de cette équipe s'articulent autour de deux axes : un axe modélisation géométrique et synthèse d'images, et un axe visualisation avancée et interaction multi-sensorielle.

1.3.2 Le Centre Technique de Simulation (CTS) de Renault

Dans l'industrie automobile, la simulation a permis de diminuer les coûts et de raccourcir le cycle de conception d'un nouveau véhicule à une durée inférieure à 24 mois, en remplaçant une grande

partie des prototypes physiques par le calcul ou la visualisation 3D. Cette réduction du délai de conception s'accompagne d'une augmentation de la complexité des systèmes embarqués dans les véhicules, visant à améliorer la sécurité, le confort et la tenue de route. C'est également grâce à la simulation que l'industrie automobile parvient à développer des véhicules conformes aux normes imposées par l'administration européenne en matière de sécurité d'émissions polluantes et acoustiques.

Cette thèse CIFRE a été réalisée au sein du CTS, sous la co-direction d'Andras Kemeny, responsable du CTS. Ce service est situé au Technocentre Renault à Guyancourt. Il a pour vocation de proposer des outils de réalité virtuelle, et en particulier de simulation de conduite, aux différents métiers de Renault (conception, calcul, ergonomie, qualité, communication, etc). Ces outils peuvent intervenir de manière transversale à différentes étapes de la conception d'un véhicule.

1.3.3 Le projet MATISS

Une partie de ces travaux a également été menée dans le cadre du projet de recherche européen MATISS (Modélisation Avancée, Techniques Interactives de Simulation pour la Sécurité). Ce projet du pôle de compétitivité MOV'EO réunit plusieurs acteurs : Renault S.A.S. (Centre Technique de Simulation et Département Ergonomie/IHM), OKTAL S.A, ainsi que les laboratoires LPC (IFSTTAR) et LPPA (Collège de France - CNRS). Son objectif est l'étude des méthodologies d'utilisation des simulateurs de conduite pour les études avancées de sécurité routière, en particulier concernant les situations critiques d'usage des systèmes d'assistance à la conduite.

1.4 Plan de lecture

La première partie de cette thèse présentera une revue bibliographique, s'articulant en trois chapitres. Le premier chapitre portera sur le conducteur. Les modalités sensorielles mises en jeu pour la conduite seront présentées. Nous définirons la tâche de conduite, et présenterons quelques exemples de modèles du conducteur. Cette liste de modèles n'a pas vocation à être exhaustive, mais plutôt à présenter quelques-uns des modèles les plus importants, afin de servir de base pour les hypothèses posées lors du travail expérimental. Une attention particulière sera portée à la situation d'évitement d'obstacle, centrale dans ce travail. Enfin, nous exposerons les différentes théories du risque.

Le deuxième chapitre s'intéressera aux systèmes d'aide à la conduite. Nous présenterons un aperçu des différentes technologies existantes. L'accent sera ensuite mis sur la thématique de la coopération Homme / machine. Nous nous intéresserons aux différentes taxonomies des niveaux d'automatisation présentes dans la littérature, puis nous donnerons un aperçu des limites du couplage Homme / machine et des défauts de coopération possibles.

Le troisième chapitre se focalisera sur la technique de la simulation de conduite. Après une

présentation de la technologie, nous ferons le tour de quelques-uns des principaux simulateurs dans le monde, ainsi que ceux du CTS et du Le2i. Nous discuterons ensuite des problématiques de validité des simulateurs de conduite, et expliquerons brièvement le phénomène de mal du simulateur.

La deuxième partie de cette thèse présentera un travail expérimental portant sur l'assistance au contrôle longitudinal. Ce travail comprend une expérimentation, réalisée dans le cadre du projet européen MATISS, portant sur la familiarisation des conducteurs à un système d'aide au contrôle longitudinal : le Forward Collision Warning.

La troisième partie présentera un travail expérimental portant sur l'assistance au contrôle latéral. Ce travail comprend deux expérimentations, réalisées sur simulateur statique et dynamique, portant sur le comportement de conducteurs avec deux systèmes d'aide au contrôle latéral : le Lane Departure Warning et le Lane Keeping Assistant. Une attention particulière sera porté à une situation d'urgence : l'évitement d'obstacle.

Enfin, nous discuterons dans une conclusion générale des principaux résultats de ces travaux, et émettrons des recommandations pour l'utilisation des simulateurs de conduite en vue de l'étude du comportement des conducteurs avec des systèmes d'aide à la conduite, et en situation d'urgence.

Première partie

Revue bibliographique

Chapitre 2

Le conducteur

2.1 Modalités sensorielles

La conduite automobile fait intervenir plusieurs modalités sensorielles : visuelle, auditive, haptique et vestibulaire. Cette section a pour objectif de les présenter rapidement, et de décrire leur rôle dans la conduite.

2.1.1 La vision

Physiologie

Afin de percevoir visuellement notre environnement, l'œil transforme les informations lumineuses en signaux transmissibles au cerveau. La figure 2.1 présente un schéma en coupe de l'œil humain. Les rayons lumineux traversent la cornée et le cristallin, et sont projetés sur la rétine, qui les transforment en signaux nerveux, envoyés au cerveau via le nerf optique. La rétine est composée de cônes et de bâtonnets. Les cônes, situés principalement dans la fovéa (zone centrale de la rétine), ont une faible sensibilité à la lumière mais une bonne perception des détails et des couleurs, grâce à leur densité très élevée, et sont donc adaptés à la vision diurne et à des activités demandant une bonne acuité, comme la lecture. Les bâtonnets, situés dans la périphérie de la rétine, ont une grande sensibilité à la lumière mais une faible perception des détails et des couleurs, et sont appropriés pour la vision nocturne.

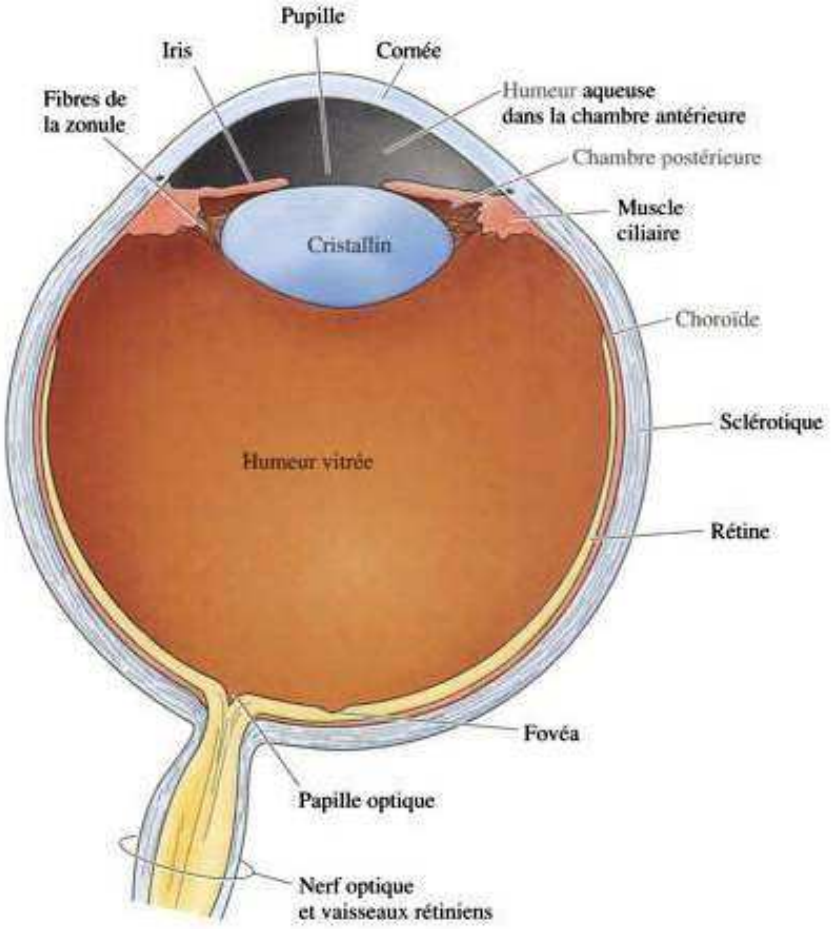


FIGURE 2.1 – Anatomie de l'œil humain (tiré de Purves et al. (2005)).

Perception visuelle du mouvement

D'après les travaux de Gibson (1950, 1979), la perception de l'environnement lors d'un mouvement se fait grâce au flux et aux perturbations des images perçues plutôt qu'à leurs formes. En effet, lorsque un observateur se déplace, l'image sur sa rétine est alors déformée. Son déplacement engendre un déplacement en sens opposé de son champ de vision. Cet déplacement, appelé *flux optique*, peut être représenté par un ensemble de vecteurs illustrant la vitesse de déplacement de chaque point sur la rétine (voir figure 2.2).

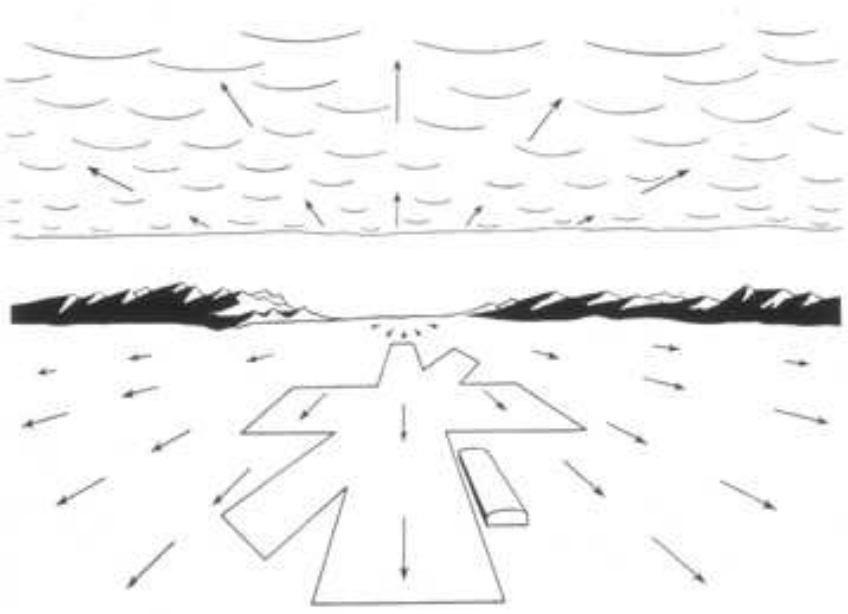


FIGURE 2.2 – Flux optique pour un pilote lors d'un atterrissage (tiré de Gibson (1950)).

En outre, Berthoz et al. (1975) souligne l'importance de la vision périphérique pour la perception du mouvement propre.

Application à la conduite automobile

La vision est une modalité prépondérante dans l'activité de conduite automobile, et est utilisée comme source d'informations principale pour le guidage du véhicule (Summala et al., 1996).

Selon Lee (1976), lorsqu'il approche d'un obstacle, le conducteur perçoit le délai avant le contact, ou *time-to-collision* (TTC, Hayward (1972)), grâce au flux optique. Selon l'auteur, le taux de dilatation de l'image de l'obstacle sur la rétine, appelé τ, est directement utilisé par le conducteur pour déclencher le freinage, et sa variation pour contrôler le déroulement du freinage. Des études ont par la suite montré que cette estimation du TTC pouvait également être influencée par la

vitesse d'approche (McLeod et Ross, 1983) ou, dans le cas d'une simulation de conduite, par le niveau de détails de l'environnement (Cavallo et al., 1997) ou encore la vision stéréoscopique (Cavallo et Laurent, 1988). Probst et al. (1984) insistent également sur le délai de détection d'une variation de la distance intervéhiculaire, en raison de l'ambiguïté entre la perception du mouvement des objets et du mouvement propre.

Lors de la prise de virage, Godthelp (1986) suggère que l'indice utilisé par le conducteur est le *time-to-line-crossing*, correspondant à un TTC avec une des deux lignes délimitant la voie. En s'intéressant à la direction du regard lors de la conduite, Land et Lee (1994) ont montré que les conducteurs, lors d'une prise de virage, concentraient leur regard autour d'un point appelé le point tangent. Selon les auteurs, la direction de ce point particulier par rapport à la direction du véhicule permet aux conducteurs de percevoir la courbure de la route lors de la prise de virage (voir figure 2.3). L'intérêt du point tangent pour la stabilité du contrôle latéral en virage a été confirmé expérimentalement par Mars (2008).

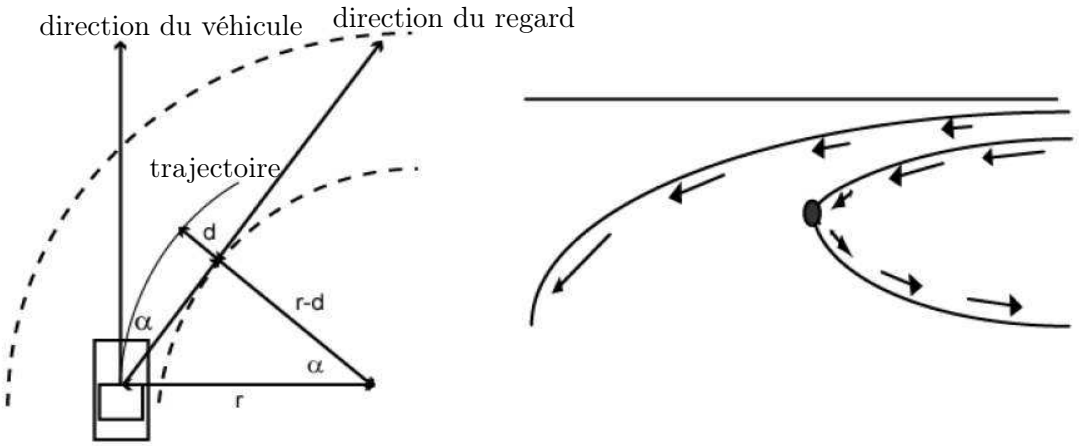


FIGURE 2.3 – Le point tangent est corrélé avec le rayon de courbure du virage (adapté de Hoc et al. (2006)).

De plus, Wilson et al. (2007) ont montré une corrélation entre les mouvements des yeux et les mouvements du volant.

2.1.2 Le système vestibulaire

Physiologie

Situé dans l'oreille interne, le système vestibulaire fonctionne comme une centrale inertielle, et permet de percevoir les accélérations de la tête, aussi bien linéaires qu'angulaires. Il est composé du nerf vestibulaire, des ganglions vestibulaires (ou ganglions de Scarpa), des canaux semi-circulaires et des organes à otolithes (l'utricule et la saccule) (voir figure 2.4).

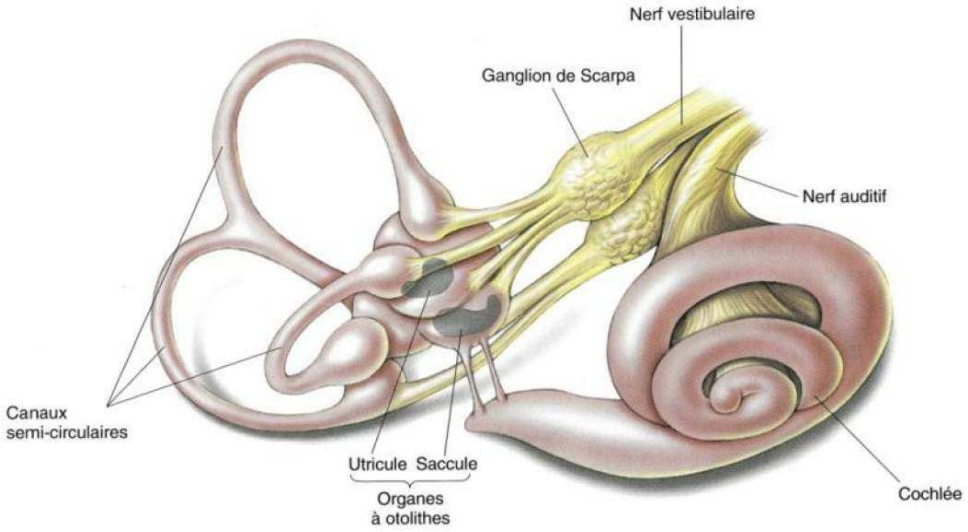


FIGURE 2.4 – Anatomie de l'oreille interne (tiré de Bear et al. (2007)).

Les canaux semi-circulaires sont au nombre de trois : canal antérieur, postérieur et latéral. Lors des rotations, un liquide contenu dans ces canaux, l'endolymphe, se déplace. Ce déplacement est alors détecté par les cellules cillées qui recouvrent la paroi des canaux. Leur disposition permet ainsi de détecter les accélérations angulaires dans les trois plans de l'espace.

Dans les organes à otolithes se trouve une zone sensorielle, la macula, composée de cellules cillées surmontées de petits cristaux appelés otolithes. L'utricule est orientée plutôt horizontalement, et la saccule verticalement. Lors d'une accélération linéaire de la tête, ces otolithes se déplacent par inertie, et leur mouvement est alors détecté par les cellules cillées. En revanche, ces organes ne permettent pas de distinguer une accélération linéaire d'une inclinaison de la tête (Berthoz, 1997). Cette ambiguïté est exploitée dans les simulateur de vol ou de conduite, comme nous le verrons par la suite.

Application à la conduite automobile

En conduite automobile, le système vestibulaire permet aux conducteurs de percevoir les accélération de leur véhicule. En effet, Page et Gresty (1985) ont montré que des patients présentant des maladies neuro-otologiques (*i.e.* des troubles de l'oreille interne) éprouvaient des difficultés à conduire un véhicule, certains sujets rencontrant des problèmes de désorientation et des nausées, d'autres altérant l'orientation de leur véhicule. Ces résultats ont également été reproduits par Clarke et al. (1996) sur simulateur de conduite, en rendant le système vestibulaire des sujets inopérants par stimulation calorique.

2.1.3 Le sens haptique

Le sens haptique regroupe à la fois le sens du toucher (tactile) et la perception de le position et du mouvement des membres par rapport au corps (proprioception ou kinesthésie).

Physiologie

La perception tactile est effectuée grâce à des récepteurs spécifiques, appelés mécanorécepteurs, situés dans les différentes couches de la peau (épiderme, derme et hypoderme). La kinesthésie est réalisée à l'aide de mécanorécepteurs situés dans les articulations et dans les muscles.

Il existe quatre types principaux de mécanorécepteurs cutanés (voir figure 2.5) (Halata et Baumann, 2008) :
- Les corpuscules de Meissner, situés sous l'épiderme, sont sensibles aux petites variations de pression sur la peau, de haute fréquence (autour de 20-30 Hz). Ils permettent de percevoir les arêtes des objets.
- Les disques de Merkel, situés également sous l'épiderme, sont sensibles aux stimulations de pression de basse fréquence (jusqu'à 10Hz). Ils permettent de percevoir les textures.
- Les corpuscules de Ruffini, situés dans le derme, sont sensibles aux stimulations de basse fréquence (jusqu'à 10 Hz) et à l'étirement de la peau. Ils permettent de percevoir la direction et l'intensité des forces statiques.
- Les corpuscules de Vater-Pacini, les plus importants en nombre, situés dans l'hypoderme, sont sensibles aux stimulations de faible amplitude et de très haute fréquence (autour de 200 Hz).

Les articulations sont pourvues de deux types de mécanorécepteurs :
- Les corpuscules de Ruffini, situées dans la couche externe fibreuse [1], renseignent sur la position et le mouvement de l'articulation.
- Les corpuscules de Vater-Parcini sont sensibles aux accélérations angulaires des articulations plutôt qu'à leur position.

Les muscles comprennent deux types de mécanorécepteurs :
- Les organes tendineux de Golgi, situés dans les jonctions myotendineuses [2], détectent la tension du muscle.
- Les fuseaux neuromusculaires, situés dans le corps du muscle, parallèlement aux fibres musculaires, mesurent la longueur du muscle ainsi que ses variations.

1. Couche extérieure du périoste, qui recouvre l'os.
2. Jonction entre le muscle et le tendon.

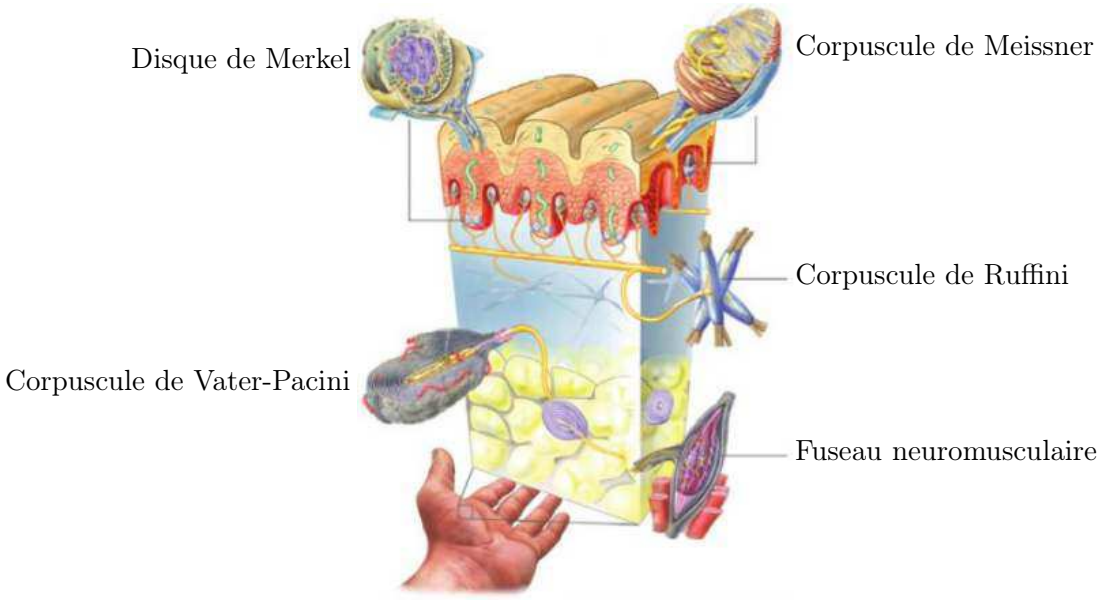


FIGURE 2.5 – Vue en coupe de la peau (adapté de Halata et Baumann (2008)).

Application à la conduite automobile

En conduite automobile, le sens haptique est très sollicité lors des interactions avec les commandes du véhicule, comme le volant ou les pédales. En effet, lors par exemple de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur, le conducteur reçoit des informations tactiles sur le contact avec la pédale, ainsi que des informations kinesthésiques sur le déplacement de la jambe effectué.

Pour le volant, le conducteur perçoit également un retour d'effort résultant de la force de contact de la route sur les pneus, ainsi que de la cinématique du système de direction (Mohellebi et al., 2009). Ce retour d'effort est proportionnel à l'angle volant, pour une vitesse et une adhérence donnés (Toffin et al., 2003). Ce retour d'effort donne au conducteur des informations sur la dynamique du véhicule, comme par exemple l'accélération latérale (Essma, 2000).

En effet, Liu et Chang (1995) ont montré, lors d'une expérimentation sur simulateur de conduite, que les conducteurs montraient moins de variabilité d'angle au volant en présence de retour d'effort. Les auteurs précisent que le retour d'effort aide en ligne droite, le retour d'effort aide les conducteurs à localiser la position centrale du volant, pour laquelle le couple renvoyé par le volant est minimum.

Toffin et al. (2007) ont montré, lors d'une expérimentation sur simulateur de conduite, que les conducteurs arrivaient cependant à s'adapter à des lois de retour d'effort variées sans altérer leur conduite. Selon les auteurs, cette adaptation a lieu au niveau haptique, plutôt qu'au niveau de la représentation de la dynamique du véhicule. Deborne (2009) a également étudié l'adaptation des conducteurs à une perte d'assistance du volant (donc une augmentation soudaine du retour

d'effort) et proposé un modèle passant par deux stratégies : la modulation d'impédance du bras (contraction de muscles supplémentaires, permettant d'être plus stable et plus robuste aux perturbations) et la mise à jour du modèle interne que le conducteur possède du volant (entraînant une modification de la cinématique des mouvements, donc de la commande motrice).

2.1.4 L'audition

L'audition est également utilisée lors de la conduite, principalement pour l'estimation de la vitesse. En effet, McLane et Wierwille (1975) ont observé, lors d'une expérimentation sur simulateur de conduite, une augmentation de la vitesse en l'absence de restitution du bruit du moteur. Ces résultats ont été confirmés par Horswill et McKenna (1999) qui ont observé, lors d'une expérimentation où des vidéos étaient projetées aux participants, un choix de vitesse plus élevée chez les sujets qui avaient le moins de retour sonore.

2.2 L'activité de conduite

La conduite automobile est une activité pratiquée de façon routinière par un grand nombre de personnes. Cependant, elle est une activité complexe, pour laquelle les conducteurs doivent interagir à la fois avec leur véhicule et avec leur environnement. Compte tenu des enjeux en terme de sécurité, de nombreux efforts ont été faits au cours des dernières décennies pour mieux comprendre cette activité, ainsi que les mécanismes cognitifs et moteurs la composant. La notion d'activité de conduite a cependant grandement évolué au fil du temps, comme le rappelle Hollnagel (2006).

Parmi les premiers travaux cherchant à comprendre l'activité de conduite, Gibson et Crooks (1938) la définissent comme une tâche de guidage, au cours de laquelle le conducteur cherche à maintenir son véhicule dans un "champ de sécurité", représente l'espace dans lequel le véhicule peut évoluer sans risque de collision, en fonction des différents obstacles présent le long de son itinéraire.

Plus tard, Allen et al. (1971) définissent la conduite comme une hiérarchie constituée de trois niveaux d'activités : des activités de contrôle (contrôle de la trajectoire et de la vitesse), des activité de guidance (gsetion de situations comme un dépassement, un croisement, etc.), et des activités de navigation (préparation d'un itinéraire, choix d'une direction). Les auteurs introduisent également la notion d'anticipation, propre à chacun de ces trois niveaux d'activité. McRuer et al. (1977) reprend cette classification en y ajoutant des tâches d'exploration visuelle de reconnaissance et de surveillance, effectuées en parallèle de ces activités. Cette hiérarchisation de l'activité de conduite a ensuite été formalisée par Michon (1985) qui propose une modélisation à trois niveaux (voir figure 2.6).

Dans ce modèle, l'activité de conduite est donc répartie en trois niveaux :

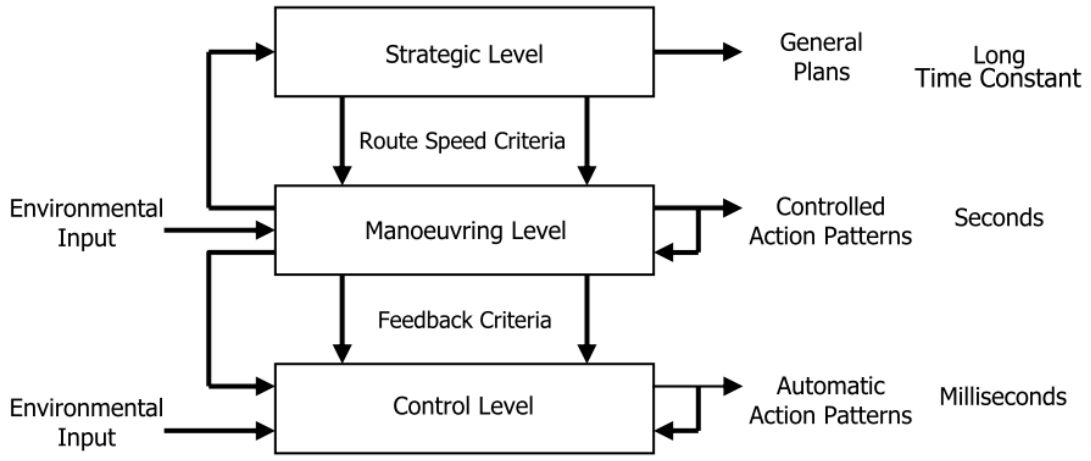


FIGURE 2.6 – Modèle hiérarchique de l'activité de conduite proposé par Michon (1985).

- *Le niveau stratégique.* Le plus haut niveau dans cette hiérarchie, le niveau stratégique définit les choix généraux que fait le conducteur sur la planification du parcours, le choix de l'itinéraire. Ces choix requièrent un investissement cognitif élevé, et se font à long terme (ils concernent l'intégralité d'un trajet).
- *Le niveau tactique.* Le niveau tactique définit les décisions d'effectuer différentes manœuvres comme un évitement d'obstacle, une prise de virage, ou un dépassement. Ces manœuvres doivent répondre aux objectifs définis au niveau stratégique, mais peuvent également, occasionnellement, contraindre ces objectifs à évoluer. Ces décisions se prennent en l'espace de quelques secondes, et requièrent peu de réflexion.
- *Le niveau opérationnel.* Ce niveau définit l'exécution des objectifs fixés aux niveaux supérieurs, ramené au niveau des contrôles du véhicule (accélération, freinage, changement de vitesse, etc), dans le but d'effectuer la manœuvre choisie. La durée d'opération est ici de l'ordre de quelques millisecondes.

Rasmussen (1986) a également proposé un modèle de l'activité de conduite à trois niveaux, en fonction des mécanismes cognitifs mis en jeu. En effet, l'auteur distingue :
- Les activités basées sur la connaissance, impliquant une réflexion consciente, et permettant de résoudre des problèmes n'ayant pas été rencontrés auparavant.
- Les activités basées sur des règles, où une règle de décision, correspondant à une situation connue, est choisie.
- Les activités basées sur des compétences, pour lesquelles une procédure connue est suivie automatiquement.

Ces trois niveaux sont évidemment à rapprocher des trois niveaux proposés par Michon (1985), comme le soulignent par exemple Ranney (1994) et Weller et al. (2006). La figure 2.7 combine ces deux modèles.

Plus récemment, Lehto (1991) a rajouté à cette hiérarchie un quatrième niveau, définissant les activités basées sur le jugement, qui prend en compte la dimension émotionnelle dans la conduite.

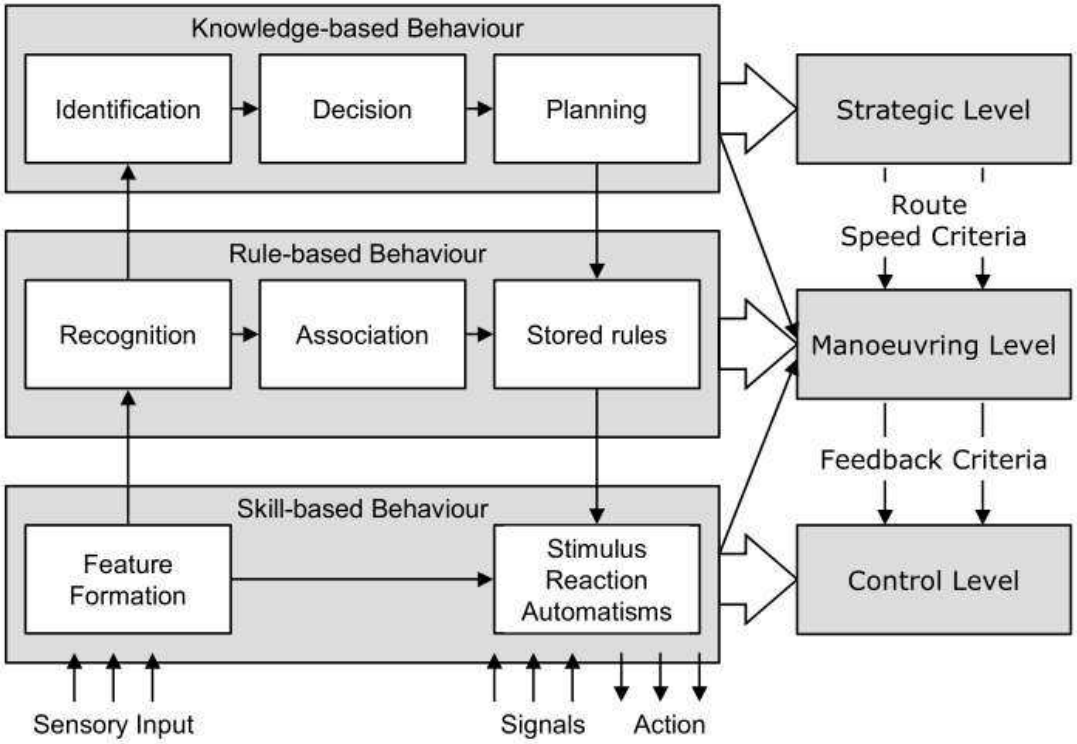


FIGURE 2.7 – Combinaison des modèles de Michon (1985) et de Rasmussen (1986), d'après Weller et al. (2006).

Un modèle du conducteur doit tenir compte de ces différents niveaux hiérarchiques, mais doit également être capable de modifier l'influence qu'ont les niveaux entre eux, en fonction de la situation (Michon, 1985). En revanche, aucun modèle global de conducteur n'a été développé à ce jour, ceux existant se concentrant généralement sur un seul de ces trois niveaux. Bien que la modélisation du conducteur ne soit pas un objectif de cette thèse, ce chapitre va néanmoins présenter quelques modèles permettant de mieux comprendre l'activité de conduite, et ayant servi de base pour établir les hypothèses dans les expérimentations présentées dans les prochains chapitres. En ce sens, l'accent sera plutôt mis sur les modèles à vocation descriptive, plutôt que sur les modèles à vocation prédictive.

2.3 Modèles opérationnels

Cette section présente quelques modèles décrivant le comportement des conducteurs selon le niveau opérationnel, ou niveau de contrôle, précédemment décrit. Ces modèles s'attachent donc

à la conduite en tant qu'activité motrice, et cherchent à représenter le conducteur comme un automate cherchant à appliquer une consigne (vitesse, angle volant) en fonction de stimuli reçus en entrée.

2.3.1 Contrôle longitudinal

Le contrôle longitudinal est l'activité de régulation de la vitesse du véhicule, effectuée à l'aide des pédales d'accélérateur et de frein. Les études de comportement du conducteur se sont focalisées principalement sur une situation de suivi de véhicule.

Les modèles de suivi de véhicule cherchent à déterminer l'état d'un véhicule suiveur (position $x_F(t)$, vitesse $v_F(t)$ et accélération $a_F(t)$) en fonction de l'état du véhicule suivi (position $x_L(t)$, vitesse $v_L(t)$ et accélération $a_L(t)$), et se présentent généralement sous la forme d'une équation de type stimulus-réponse (Subramanian, 1996) :

$$Réponse(t) = Sensibilité \times Stimulus(t - T) \tag{2.1}$$

Où *Réponse* est la réaction du véhicule suiveur aux actions du véhicule le précédant, ou *Stimulus*. Le terme T représente le temps de réaction du conducteur.

Un des premiers modèles de suivi de véhicule est celui proposé par Chandler et al. (1958), selon lequel l'accélération du véhicule suiveur est définie par :

$$a_F(t) = K \cdot (v_L(t - T) - v_F(t - T)) \tag{2.2}$$

Où K représente un paramètre de sensibilité supposé constant.

De nombreux développements ont par la suite cherché à améliorer ce modèle. Le paramètre de sensibilité a en effet été modifié, afin de le rendre inversement proportionnel à la distance séparant les deux véhicules (Gazis et al., 1959), ou à une distance minimale (Leutzbach et Wiedemann, 1986).

Ce type de modèle est aujourd'hui largement accepté, et appuyé par des études expérimentales (voir par exemple Ranjitkar et al. (2005)). En revanche, de nombreuses études se sont penchées plus précisément sur les indices utilisés par les conducteurs pour réguler leur vitesse. Boer (2005), par exemple, a utilisé le *temps intervéhiculaire* (TIV), défini par l'équation 2.3 :

$$TIV(t) = \frac{x_F(t) - x_L(t)}{v_F(t)} \tag{2.3}$$

L'auteur a en effet montré que la stratégie de suivi de véhicule dépendait du TIV "cible" des conducteurs : la variabilité du TIV augmente avec sa valeur absolue, c'est-à-dire que les conducteurs conduisant plus loin du véhicule les précédant acceptent une variabilité plus importante.

2.3.2 Contrôle latéral

Le contrôle latéral est l'activité de régulation de la position latérale du véhicule dans la voie au moyen du volant. Cette activité englobe aussi bien la conduite en ligne droite que la prise de virage.

Weir et McRuer (1968) ont proposé un modèle de contrôle latéral intégrant deux niveaux : le niveau de poursuite et le niveau de compensation. Le niveau de poursuite fonctionne en boucle ouverte, c'est-à-dire que la perception seule de son environnement permet au conducteur de calculer un angle volant à fournir en réponse. En parallèle, le niveau de compensation fonctionne en boucle fermée : par rétroaction, le conducteur peut compenser les erreurs commises au niveau de poursuite. La figure 2.8 illustre le modèle de Weir et McRuer (1968).

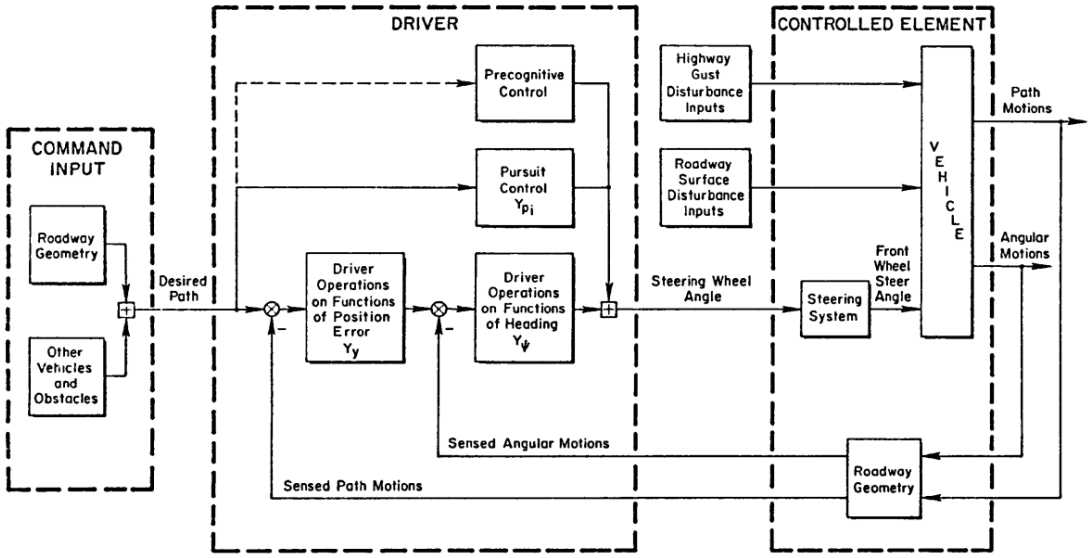


FIGURE 2.8 – Modèle de Weir et McRuer (1968) décrivant le contrôle latéral du point de vue environnement/conducteur/véhicule.

Conduite en virage

Donges (1978) a proposé un modèle de contrôle latéral en virage. Ce modèle fonctionne selon deux niveaux comparables : un niveau de contrôle par anticipation, en boucle ouverte, et un niveau de contrôle compensatoire, en boucle fermée. Dans le contrôle en boucle ouverte, le conducteur

applique par anticipation un angle au volant en fonction de la trajectoire désirée. Au cours du contrôle en boucle fermée, il corrige l'angle au volant, en fonction de la différence entre la trajectoire souhaitée et la trajectoire résultante de l'action anticipatrice. La figure 2.9 résume ce modèle.

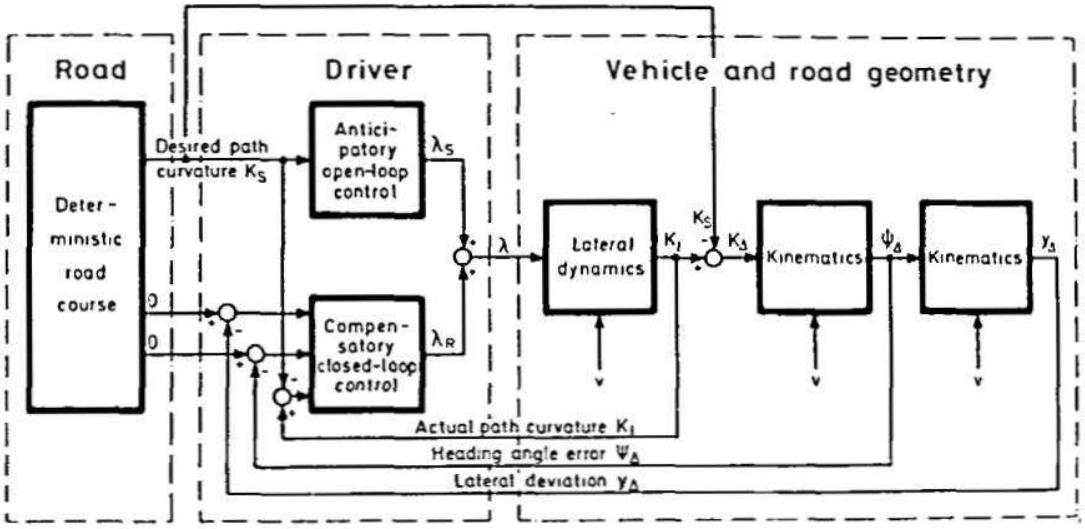


FIGURE 2.9 – Modèle de contrôle latéral de Donges (1978).

Pour ce cas plus particulier de la prise de virage, de nombreuses études ont cherché à identifier les indices sensoriels utilisés par le conducteur pour évaluer l'erreur de trajectoire, et ainsi effectuer l'action compensatoire précédemment décrite. Selon Donges (1978), cette évaluation passe par la perception de la déviation latérale du véhicule, de l'angle formé par les tangentes des trajectoires réelle et souhaitée, ainsi que de la différence de courbure entre ces deux trajectoires. L'auteur explique que ces quantités sont perçues visuellement, grâce au mouvement des lignes délimitant la voie dans le champ de vision du conducteur.

Godthelp et al. (1984) suggèrent que la régulation du contrôle latéral ne se résume pas à une stratégie de correction en boucle fermée. Les auteurs introduisent un indice, le *time-to-line-crossing* (TLC), représentant le temps nécessaire au véhicule pour atteindre le bord de sa voie, en supposant l'angle au volant constant. Cette indice représente donc le temps pendant lequel le conducteur peut négliger les erreurs de direction pour se concentrer sur d'autres aspects de la conduite. Il peut alors adopter une stratégie d'angle au volant constant, pour utiliser une stratégie en boucle fermée lorsque le TLC devient trop critique.

Godthelp (1986) précise que lors de la conduite en virage, les stratégies de contrôle par anticipation et par compensation ne s'effectuent pas en parallèle comme suggéré par Donges (1978), mais en série, selon trois phases :

1. Le conducteur applique un angle au volant par anticipation, avant même de rentrer dans la courbe, en fonction d'une courbure estimée. L'auteur calcule une approximation de l'angle

au volant nécessaire selon l'équation 2.4 :

$$\delta_s = \frac{G \cdot l \cdot (1 + K \cdot u^2) \cdot c_r}{1000} \tag{2.4}$$

Où $G(m)$ est le coefficient de démultiplication du volant, $l(m)$ l'empattement du véhicule, $K(s^2/m^2)$ un facteur de stabilité propre au véhicule, $u(m/s)$ la vitesse du véhicule et $c_r(km^{-1})$ la courbure de la route.

2. Lors d'une phase stationnaire, le conducteur applique des mouvements correctifs au volant.
3. Le conducteur ramène le volant vers sa position centrale lors de la sortie du virage.

Cependant, la conduite en virage fait également intervenir une composante contrôle longitudinal. Certains auteurs ont donc cherché à lier ces deux aspects de la conduite. Selon van Winsum et Godthelp (1996), le TLC est utilisé par les conducteurs pour réguler leur vitesse en virage. Les auteurs ont montré, lors d'une expérimentations où les sujets conduisaient dans des virages de différents rayons de courbure, que les sujets diminuaient leur vitesse lorsque le rayon de courbure diminuait, afin de maintenir un TLC minimum et une erreur relative d'angle au volant constants.

Selon une même approche, Reymond et al. (2001) ont montré que les conducteurs utilisaient également l'accélération latérale comme indice pour réguler leur vitesse lors de la conduite en virage. Les auteurs définissent ainsi une accélération latérale maximale acceptée par les conducteurs, leur permettant de conserver une marge de sécurité en cas d'évènement inattendu. L'accélération latérale est ainsi contrainte selon l'équation 2.5 :

$$\Gamma < \frac{\delta_{max}}{L} \cdot V^2 \tag{2.5}$$

Où $\Gamma(m/s^2)$ est l'accélération latérale du véhicule, δ_{max} l'angle volant maximal, $L(m)$ l'empattement du véhicule et $V(m/s)$ la vitesse du véhicule.

2.4 Le cas particulier de l'évitement d'obstacle

Afin d'éviter un obstacle inattendu, les conducteurs ont le choix entre deux stratégies : le freinage ou le déport latéral. Selon les situations, ils peuvent ainsi appliquer l'une ou l'autre de ces stratégies, ou encore les deux à la fois. En reprenant le contexte du suivi de véhicule (voir paragraphe 2.3.1), le *time-to-collision* (voir 2.1.1) peut être exprimé par l'équation 2.6, en supposant les accélérations des véhicules constantes :

$$TTC(t) = \frac{x_F(t) - x_L(t)}{v_L(t) - v_F(t)} \tag{2.6}$$

Lechner et Malaterre (1991) ont montré que cet indice influençait la réaction des conducteurs. La réaction majoritaire des conducteurs est en effet de freiner lorsqu'ils disposent de suffisamment de temps pour éviter l'obstacle, ou de se déporter lorsque le TTC devient plus critique.

Malaterre (1987) rappelle que, alors qu'il est préférable dans la majorité des cas, le déport latéral est sous-utilisé en situation d'urgence, au profit du freinage. Selon l'auteur, ce comportement est dû à deux raisons principales. Premièrement, le choix du déport nécessite plus d'informations et des estimations plus précises que le choix du freinage, et donc représente une charge cognitive plus importante. Deuxièmement, l'échec du déport n'apporte aucun gain, alors que l'échec du freinage diminuera au moins la force de l'impact.

Reid et al. (1981) se sont intéressés à la composante contrôle latéral de l'évitement d'obstacle. Lors d'une expérimentation sur route et sur simulateur, les auteurs ont présenté aux sujets un obstacle à éviter, qui apparaissait subitement devant leur véhicule. Ils ont proposé un modèle de conducteur pour l'évitement d'obstacle. Ce modèle fonctionne selon trois phases successives (Reid et al., 1981; Reid, 1983) :

1. L'obstacle est détecté. Le conducteur braque pour l'éviter.

2. La trajectoire du véhicule lui permet d'éviter l'obstacle. Le conducteur cherche alors à se stabiliser sur la voie adjacente.

3. Le véhicule a dépassé l'obstacle. Le conducteur revient sur la voie de départ et s'y stabilise.

Selon Reid et al. (1981), pour éviter un obstacle le conducteur utilise un point de repère (*sight point*, voir figure 2.10), et base sa réponse uniquement sur l'angle formé entre l'orientation du véhicule et la direction de ce point de repère. Cet angle est ainsi utilisé en entrée du modèle proposé par les auteurs pour calculer l'angle appliqué au volant pour éviter l'obstacle.

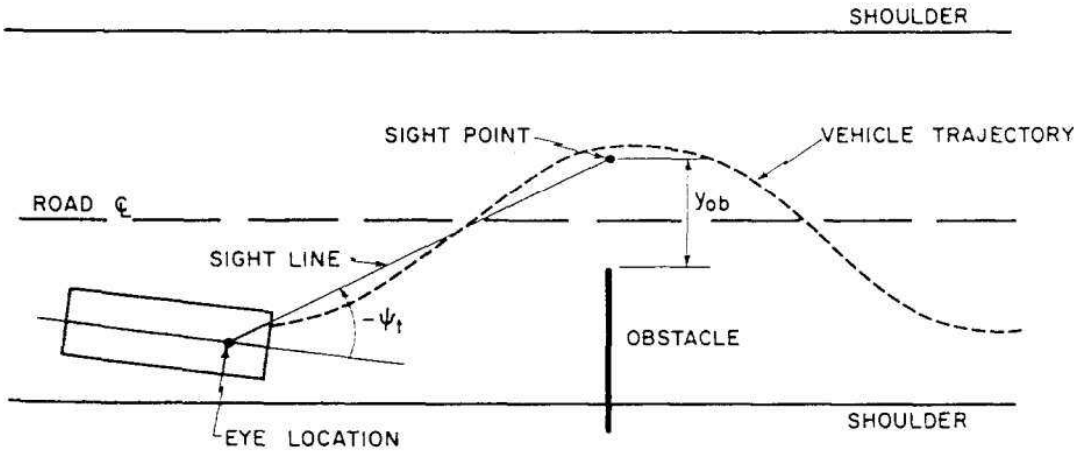


FIGURE 2.10 – Géométrie de la manœuvre d'évitement d'obstacle, d'après Reid (1983).

2.5 Les théories du risque

Le risque peut être considéré selon trois composantes (Wang et al., 2002) :
– le risque objectif, qui correspond au produit de la probabilité qu'un événement se produise par sa gravité
– le risque subjectif, ou risque perçu, qui est l'estimation du risque par le conducteur
– le risque acceptable, qui représente le niveau de risque que le conducteur est prêt à prendre, suivant le niveau de mobilité recherché

Au cours des dernières décennies, de nombreux auteurs ont cherché à produire un modèle descriptif, afin d'expliquer la façon dont les conducteurs perçoivent le risque et comment ils y réagissent. Aujourd'hui, plusieurs théories existent. En voici les principales.

La théorie de l'homéostasie du risque

Wilde (1994) considère que les conducteurs choisissent, généralement inconsciemment, un niveau de risque "optimal", en évaluant les utilités (*i.e.* coûts et bénéfices) des conduites sûre et risquée, et en adoptant un compromis. Les conducteurs évaluent alors le risque de la situation de conduite et le comparent à leur niveau de risque "cible", puis adoptent alors les corrections nécessaires afin de ramener le niveau de risque à celui désiré (que la différence soit positive ou négative). La figure 2.11 résume ce processus. Ce schéma considérant une population dans son ensemble, le bloc e correspond au nombre d'accidents résultant du comportement des conducteurs, et la flèche f à la communication de ces statistiques aux conducteurs, via les médias par exemple, qui influencent ensuite leur perception du risque.

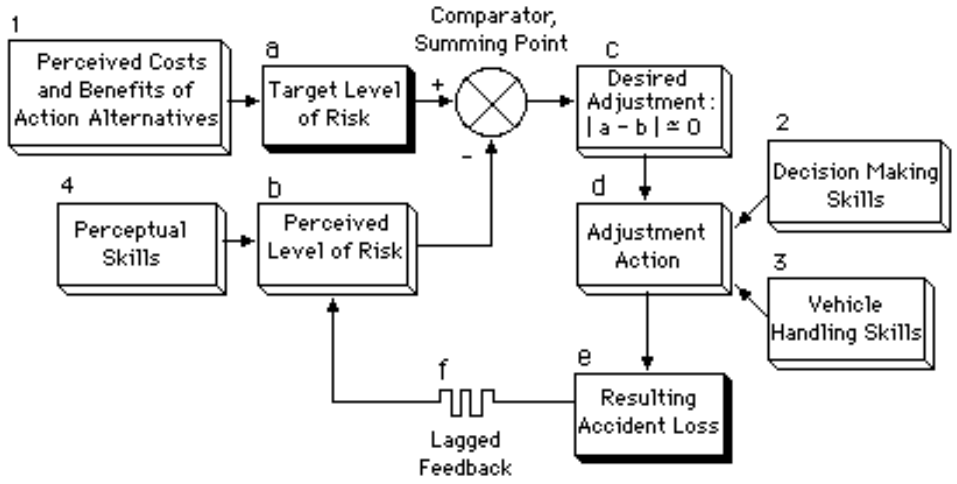


FIGURE 2.11 – Modèle homéostatique (Wilde, 1994).

La théorie de l'homéostasie du risque suggère ainsi que, lors de l'introduction de nouvelles mesures de sécurité, le taux d'accidents restera constant. Stanton et Pinto (2000) précisent que la simple technologie (comme les systèmes d'aide à la conduite) ne suffit pas à améliorer la sécurité, et qu'une approche plus centrée sur le conducteur est nécessaire. En effet, ces systèmes réduisent le risque intrinsèque à la conduite, qui sera de toute façon compensé par le conducteur. Une meilleure solution consisterait alors à manipuler directement les utilités évaluées par le conducteur (Stanton et Glendon, 1996).

Partant de cette théorie, Stanton et Pinto (2000) ont réalisé une étude sur un simulateur de conduite, portant sur un système de vision par caméra infrarouge utilisé dans des conditions de vision difficile (nuit et brouillard). Les auteurs ont comparé les vitesses moyennes des conducteurs en conduite normale ou difficile, ainsi que sans et avec le système infrarouge. Leurs résultats ont montré, conformément aux prédictions de la THR, que les conducteurs réduisaient leur vitesse dans les conditions difficiles. Lors de l'ajout du système, ils augmentaient leur vitesse, se rapprochant alors de la vitesse moyenne observée en conduite normale (les conducteurs ont alors compensé une baisse du risque perçu). Les auteurs ont ensuite introduit une panne du système lors d'une conduite dans le brouillard. Après la panne, les conducteurs ont diminué leur vitesse. Ils semblent donc avoir ré-évalué à la baisse l'apport du système, qu'ils ont alors compensé en diminuant leur vitesse (même sur-compensé, la vitesse moyenne après la panne étant plus basse que lors de la conduite sans le système). On peut donc voir qu'ici la panne du système d'aide a eu, paradoxalement, un effet positif sur la sécurité.

La théorie du risque zéro

Selon Summala (1988), les conducteurs n'évaluent pas le risque d'accident de manière continue tout au long de la conduite, mais réagissent plutôt à une situation où il devient trop important, par rapport à un seuil subjectif. En effet, les conducteurs peuvent ressentir de la peur dans certaines situations dangereuses, et modifient par la suite leur comportement. Un conducteur ayant déjà fait l'expérience d'une situation dangereuse cherchera donc par la suite à éviter ce genre de situation, ainsi son niveau de risque subjectif sera nul. L'auteur suggère que le *time-to-collision*, par exemple (voir 2.4), est un bon indicateur du type d'évaluation que les conducteurs peuvent faire inconsciemment.

La théorie de tâche-capacité

Dans une ambition de rejoindre la théorie d'homéostasie du risque et la théorie du risque zéro, Fuller (2000) propose un modèle descriptif de la tâche de conduite, le *modèle tâche-capacité*. Selon l'auteur, la conduite est en réalité l'interface entre la demande d'un environnement et la capacité de l'individu qui évolue dans cet environnement (provenant de ses compétences et de sa capacité à l'instant t). La différence des deux crée ainsi la difficulté de la tâche de conduite perçue par le conducteur. Le conducteur arrive ainsi à maintenir une conduite sûre si sa capacité

est supérieure à la demande de la tâche. Pour cela, il peut influer à la fois sur la demande de la tâche (via sa vitesse, sa position sur la route, la communication avec les autres véhicules, etc) et sur sa capacité (par le niveau de concentration par exemple). La figure 2.12 présente une vue schématique de ce modèle. L'auteur précise que le modèle repose sur le principe que le niveau de risque désiré par le conducteur est nul, car il fera tout pour éviter un accident, perçu comme pénalisant.

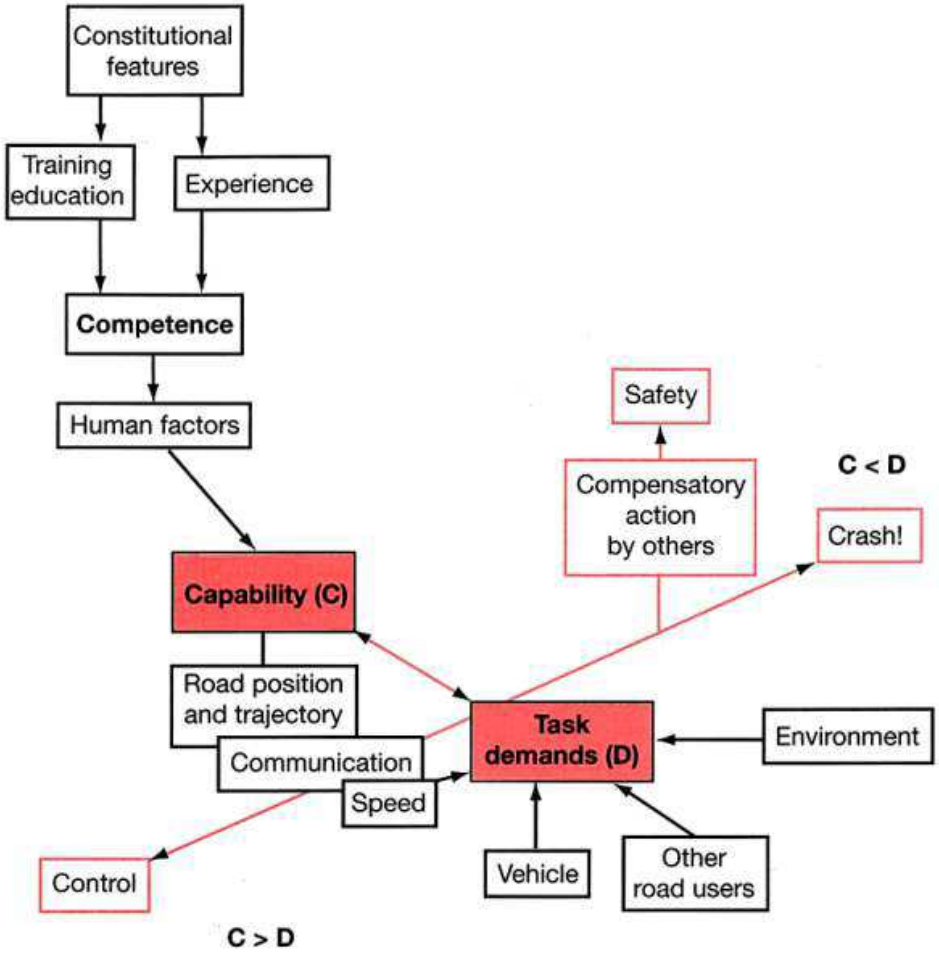


FIGURE 2.12 – Le modèle tâche-capacité (Fuller, 2000).

Plus récemment, Fuller (2011) a proposé une variante de sa théorie, la *théorie d'allostasie du risque*. Selon l'auteur, plutôt que chercher à atteindre une cible précise par une boucle de rétrocontrôle, le conducteur cherche plutôt à maintenir son sentiment de risque (ou, de manière équivalente, de difficulté de la tâche) dans un intervalle considéré comme acceptable. Ce niveau acceptable peut varier selon des facteurs interindividuels comme l'âge, le sexe ou la personnalité, mais aussi selon des facteurs intraindividuels comme l'état émotionnel ou l'objectif du trajet.

En se basant sur cette théorie, Lewis-Evans et Rothengatter (2009) ont réalisé une étude sur simulateur et ont observé que les évaluations subjectives du risque perçu et de la difficulté de la tâche de conduite, exprimés en fonction de la vitesse, n'augmentent pas de façon linéaire, mais plutôt au-delà d'un certain seuil. De plus, les auteurs ont observé une forte corrélation entre les évaluations subjectives de la difficulté, du risque et de l'effort.

Toutefois, les théories du risque sont sujettes à débat. En effet, Rothengatter (2002) propose une revue critique de ces théories. L'auteur avance que la théorie de l'homéostasie du risque ne fait que déplacer le problème, car la manière dont les conducteurs comparent le risque perçu au risque ciblé reste floue. De plus, le consensus actuel rejetterait l'idée de l'adaptation systématique du conducteur afin de maintenir un niveau de risque constant. A propos de la théorie du risque zéro, l'auteur précise que là encore se pose la question de savoir comment les conducteurs détectent lorsque le risque dépasse leur seuil subjectif, sans l'évaluer constamment. A propos du modèle tâche-capacité de Fuller, Rothengatter (2002) avance que la concentration sur les performances a plus de chances de se montrer fructueuse que la notion évasive de "perception du risque", mais que Fuller tombe dans le même piège que Wilde en définissant un modèle d'homéostasie de la difficulté de la tâche (Fuller et Santos, 2002), très similaire au modèle de Wilde, remplaçant la notion de risque par celle de difficulté de la tâche. D'une manière générale, Carsten (2002) avance que "la plupart de ces modèles sont uniquement descriptifs, et ne sont donc ni prédictifs ni vérifiables. Ils tendent à prendre la forme de diagrammes de flux complexes, qui n'établissent souvent pas beaucoup plus que le fait que le comportement humain est complexe et influencé par beaucoup de facteurs."

L'adaptation comportementale

Plus récemment, ces théories ont été réunies sous le terme plus générique d'adaptation comportementale, introduit par l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (1990). Ce terme définit d'une façon plus générale les comportements induits chez les conducteurs, lors d'une modification dans le système route-véhicule-conducteur, non prévus par les initiateurs de cette modification.

Smiley (2000) complète cette définition en ajoutant que, si l'on considère que l'objectif de la modification est d'améliorer la sécurité, l'adaptation comportementale a un impact négatif et non prévu par les concepteurs. L'auteur précise que, contrairement à la théorie de l'homéostasie du risque qui considère que la prise de risque représente la motivation centrale du comportement des conducteurs, l'adaptation comportementale se focalise sur la réallocation intelligente de l'attention et de l'effort. En outre, si l'adaptation comportementale suggère que la réduction du taux d'accidents résultant d'une mesure de sécurité est plus faible que celle attendue, elle ne fait pas l'hypothèse, comme la théorie de Wilde, d'un taux d'accidents constant.

Evans (2004) définit un concept équivalent, qu'il appelle le feedback comportemental (*human-behavior feedback*), défini par l'équation 2.7 :

$$\Delta S_{obs} = (1 + f)\Delta S_{att} \tag{2.7}$$

Où, lors de l'introduction d'une mesure de sécurité, ΔS_{att} représente le gain de sécurité attendu, et ΔS_{obs} le gain de sécurité observé. Le feedback comportemental est alors représenté par le terme f. Selon l'auteur, le gain de sécurité observé n'est pas nécessairement négatif, mais peut refléter plusieurs cas de figure :
– La sécurité est améliorée plus que prévu ($f > 0$)
– La sécurité est améliorée à peu près comme prévu ($f = 0$)
– La sécurité est améliorée, mais moins que prévu ($-1 < f < 0$)
– A peu près aucun effet ($f = -1$)
– Effet pervers, la sécurité est diminuée ($f < -1$)
L'auteur ajoute qu'une modification du comportement des conducteurs ne peut apparaître qu'en réponse de technologies leur fournissant un retour évident.

De la même manière, Weller et Schlag (2007) définissent pour une mesure de sécurité le gain de sécurité "net" comme la différence entre les effets bénéfiques souhaités par les concepteurs et les effets de l'adaptation comportementale.

Weller et Schlag (2007) proposent également un modèle de l'adaptation comportementale, résumant les conditions menant à une adaptation (voir figure 2.13). Selon ce modèle, pour qu'une adaptation comportementale ait lieu, il faut d'abord que la mesure introduite donne la possibilité objective aux conducteurs de modifier leur comportement avec un impact négatif sur la sécurité. Ensuite, il faut que les conducteurs perçoivent cette possibilité (via la communication ou l'interaction avec le véhicule). Enfin, les conducteurs doivent considérer cette modifications de leur comportement comme positive pour eux. Parallèlement à ces conditions, l'adaptation comportementale peut aussi avoir lieu si la mesure diminue la charge mentale, ce qui peut entraîner directement des comportements plus risqués, comme une augmentation de la vitesse.

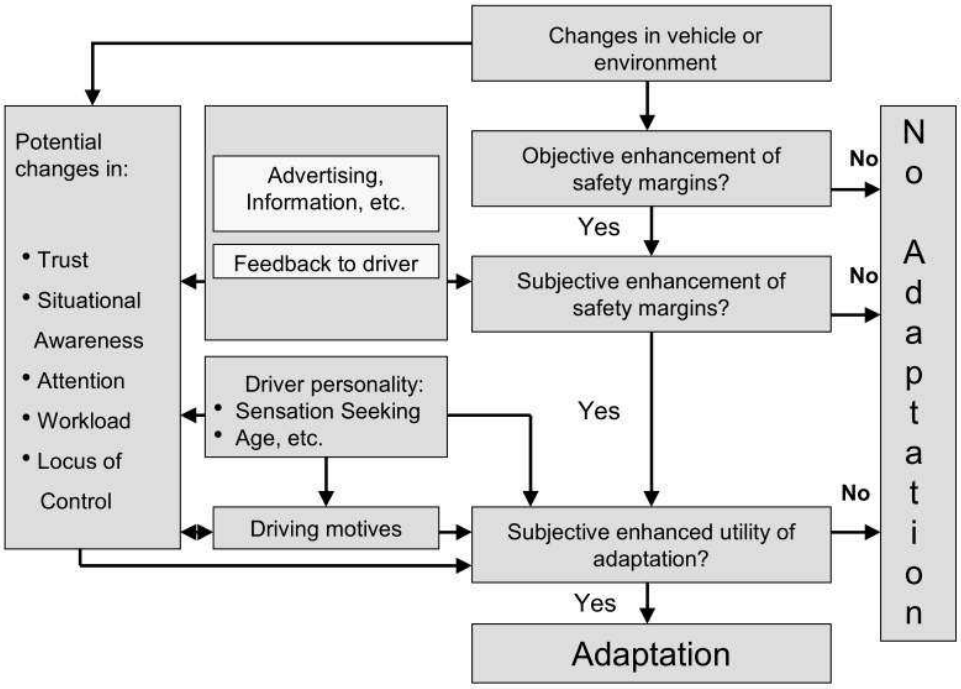


FIGURE 2.13 – Modèle de l'adaptation comportementale (Weller et Schlag, 2007).

Chapitre 3

Les systèmes d'aide à la conduite

3.1 Technologie

Les systèmes d'aide à la conduite regroupent tous les dispositifs intégrés au véhicule pour aider le conducteur, dans le but d'améliorer le confort ou la sécurité. L'accent sera mis ici plutôt sur les systèmes visant à améliorer la sécurité, en raison de l'orientation de ce travail de thèse. Ces systèmes peuvent aider le conducteur sur différents aspects, principalement le contrôle longitudinal et latéral.

3.1.1 Aide au contrôle longitudinal

Adaptive Cruise Control

L'Adaptive Cruise Control (ACC) est un système reprenant le principe du régulateur de vitesse : il permet de maintenir le véhicule à une vitesse constante, choisie par le conducteur, sans toucher à la pédale d'accélérateur. En revanche, si le véhicule de devant se trouve trop proche, il ralentit le véhicule afin de garder une distance intervéhiculaire suffisante (*i.e.* supérieure à une distance minimale choisie). Pour cette raison, on parle aussi de régulateur de distance (Villame, 2004). La figure 3.1 illustre les différents mode de fonctionnement de l'ACC.

Stop & Go

Le Stop & Go est une variante de l'ACC. Alors que l'ACC ne fonctionne qu'au-dessus d'une certaine vitesse et fournit une décélération limitée, le Stop & Go fonctionne à basse vitesse et peut ralentir jusqu'à l'arrêt complet du véhicule. L'ACC est plutôt prévu pour une utilisation

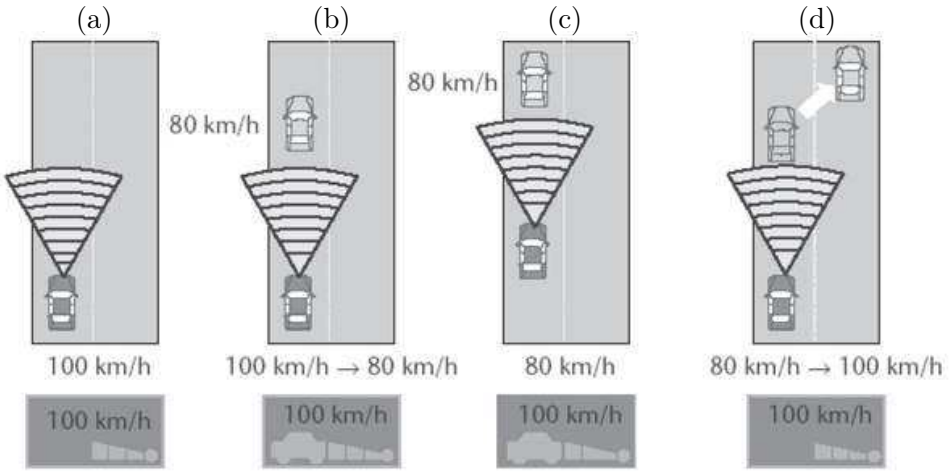


FIGURE 3.1 – Modes de fonctionnement de l'Adaptive Cruise Control (adapté de van Driel (2007)) : (a) vitesse constante, (b) décélération, (c) suivi de véhicule, (d) accélération.

sur autoroute en circulation fluide, alors que le Stop & Go est plutôt prévu pour la conduite dans les embouteillages (van Driel, 2007).

Forward Collision Warning

Le Forward Collision Warning (FCW) est un système permettant de prévenir le conducteur lorsque la distance qui le sépare au véhicule le précédant est trop courte. Pour cela, les modalités de l'alerte sont variées : le plus souvent visuelle et sonore, elle peut également consister en une vibration du siège du conducteur, ou une légère tension de la ceinture de sécurité.

Systèmes d'alerte de vitesse limite

Le Curve Speed Warning (voir figure 3.3) est un système qui permet de prévenir le conducteur lorsqu'il roule à une vitesse trop élevée à l'approche d'un virage. Couplé à un système GPS et une carte numérique, le système peut ainsi déterminer la vitesse maximale à adopter dans le virage en fonction de son rayon de courbure, mais aussi en fonction des conditions météo grâce à un capteur de pluie. Le système émet alors une alerte visuelle et/ou sonore si la vitesse est trop élevée.

Le système Intelligent Speed Adaptation (ISA) repose sur le même principe, mais surveille la vitesse du véhicule par rapport à la vitesse limite en vigueur sur la route où il se trouve. Deux variantes de l'ISA existent : l'ISA passif émet une alerte lorsque la vitesse est trop élevée (en affichant par exemple un icône représentant un panneau de limitation de vitesse sur le tableau de bord), alors que l'ISA actif ralentit le véhicule, en agissant sur le frein ou sur le régime moteur



FIGURE 3.2 – Alerte visuelle du Forward Collision Warning proposé par Volvo : une barre de LED s'illumine en rouge pour signaler une distance intervéhiculaire trop courte.

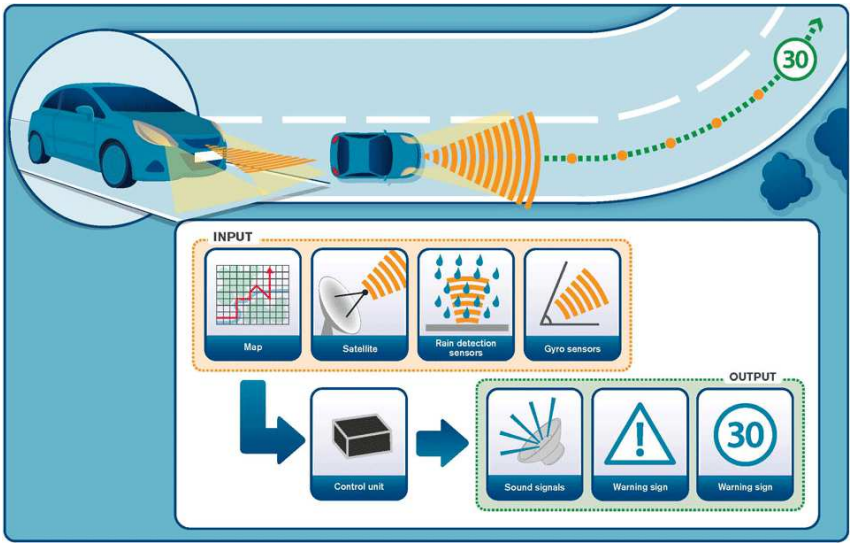


FIGURE 3.3 – Principe du Curve Speed Warning (source : euroFOT).

(Bishop, 2005).

3.1.2 Aide au contrôle latéral

Lane Departure Warning

Le Lane Departure Warning (LDW, voir figure 3.4) est un système prévenant le conducteur lorsqu'il sort de sa voie. Pour cela, une caméra située à l'avant du véhicule permet de détecter les lignes blanches. Lorsque le véhicule se rapproche trop du bord de la voie, une alerte est émise. Cette fois encore, les modalités d'alerte sont variées : elle peut être sonore (et latéralisée en fonction de la direction de la sortie), visuelle, ou haptique via une vibration du siège ou du volant.

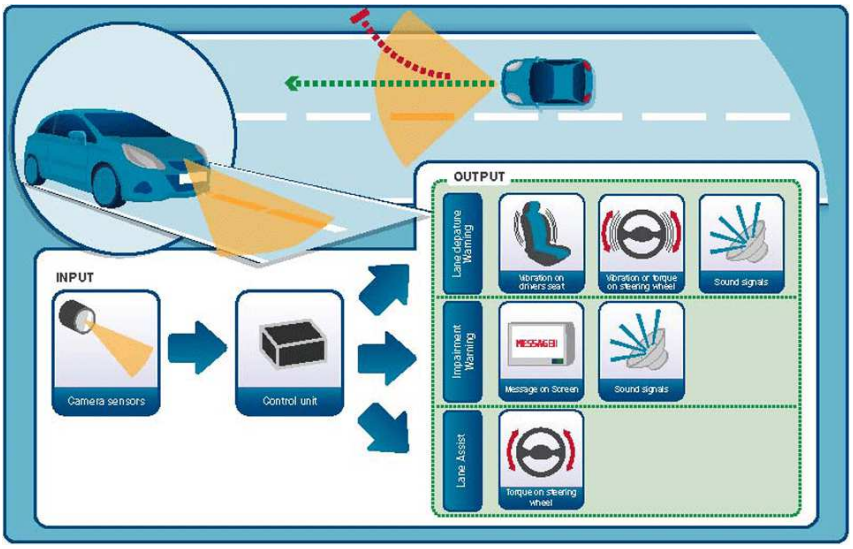


FIGURE 3.4 – Principe du Lane Departure Warning (source : euroFOT).

Lane Keeping Assistant

Reprenant le principe du LDW, le Lane Keeping Assistant (LKA) détecte les sorties de voie. En revanche, au lieu de prévenir le conducteur, le LKA applique un couple au volant permettant d'aider le conducteur à ramener son véhicule vers le centre de la voie.

Blind Spot Detection

Le Blind Spot Detection est un sytème avertissant le conducteur de la présence d'un véhicule dans son angle mort. Il utilise pour cela des caméras situées dans les rétroviseurs, et active une alerte lumineuse si un véhicule est détecté (voir figure 3.5.

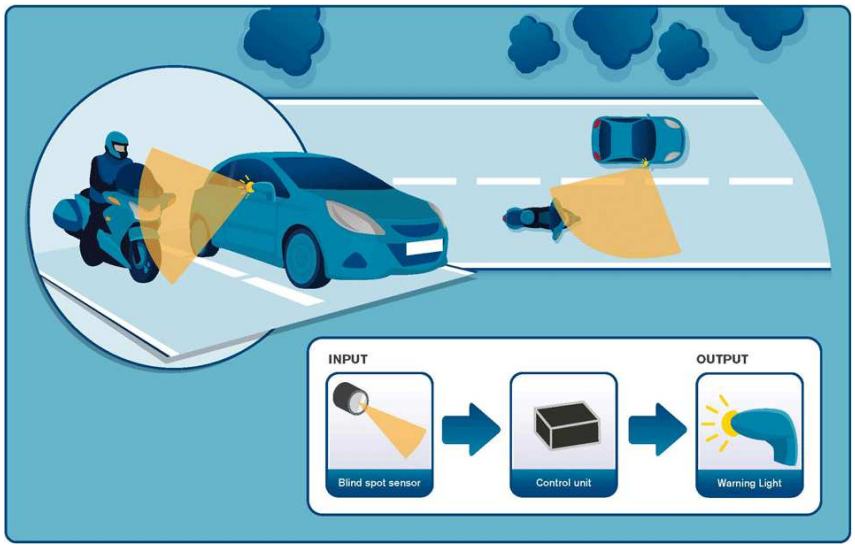


FIGURE 3.5 – Principe du Blind Spot Detection (source : euroFOT).

3.2 La coopération Homme / machine

Comme le précisent Parasuraman et al. (2000), « l'automatisation ne remplace pas simplement l'activité humaine, mais la modifie, souvent d'une façon non souhaitée et non prévue par les concepteurs de l'automatisation ». De nombreux auteurs ce sont donc penchés sur les mécanismes sous-jacents de la coopération Homme / machine, et notamment dans le cas des systèmes d'aide à la conduite.

3.2.1 Niveaux d'automatisation

C'est Sheridan et Verplanck (1978) qui ont en premier introduit le concept de niveaux d'automatisation. Les auteurs, qui se sont intéressé au futur des appareils sous-marins, proposent une échelle à 10 niveaux pour caractériser le degré d'automatisation d'une machine pour une action souhaitée par l'humain :

1. L'humain fait tout le travail.

2. La machine aide, en proposant des options.
3. La machine aide à choisir parmi les options et en sélectionne une, que l'humain n'est pas obligé de choisir.
4. La machine choisit une option et suggère une action, que l'humain peut exécuter.
5. La machine choisit l'action et l'exécute si l'humain approuve.
6. La machine choisit l'action, en informe l'humain pour lui laisser le temps de l'arrêter, puis l'exécute automatiquement.
7. La machine exécute automatiquement l'action et en informe l'humain.
8. La machine exécute automatiquement l'action et en informe l'humain uniquement si celui-ci le demande.
9. La machine exécute automatiquement l'action et en informe l'humain uniquement si elle le décide.
10. La machine exécute l'action si elle la considère nécessaire et en informe l'humain si elle le décide.

Endsley (1987) s'est intéressé aux systèmes experts assistant les pilotes d'avion pour les prises de décision, et a distingué cinq niveaux d'automatisation :

1. Contrôle manuel : aucune assistance du système.
2. Aide à la décision : l'opérateur humain décide, avec l'aide du système qui fournit des recommandations.
3. Intelligence artificielle consensuelle : le système décide mais nécessite l'accord de l'opérateur pour implémenter l'action.
4. Intelligence artificielle contrôlée : le système décide et implémente l'action, mais l'opérateur peut l'en empêcher.
5. Automatisation complète sans intervention de l'opérateur.

Par la suite, Endsley et Kaber (1999) ont dégagé quatre fonctions principales pouvant être assignées à l'humain ou à la machine :
– Surveillance : acquisition d'informations.
– Génération d'options : formulations des différentes options possibles.
– Sélection : choix d'une stratégie.
– Implémentation : exécution de la stratégie sélectionnée.

Les auteurs définissent les dix niveaux d'automatisation suivants :

1. Contrôle manuel : l'humain réalise toutes les tâches.
2. Aide à l'action : la machine aide l'humain à la réalisation de l'action choisie, mais des actions de l'humain peuvent être nécessaires.

3. Traitement séquentiel : l'humain choisit l'action à réaliser, puis la transfère à la machine qui l'exécute automatiquement. Les auteurs citent notamment l'exemple du régulateur de vitesse.
4. Contrôle partagé : l'humain et la machine génèrent les options possibles. En revanche, seul l'humain choisit l'option à implémenter. L'exécution de l'action est ensuite partagée entre l'humain et la machine.
5. Aide à la décision : l'humain et la machine génèrent les options possibles. L'humain choisit la stratégie à implémenter. L'exécution de l'action est ensuite réalisée automatiquement par la machine.
6. Prise de décision conjointe : la machine génère une liste d'options et en choisit une. L'humain peut accepter cette option ou en choisir une autre. La machine exécute l'action.
7. Système rigide : la machine sélectionne une liste restreinte d'options. L'humain en choisit obligatoirement une dans cette liste. La machine exécute l'action.
8. Prise de décision automatique : la machine choisit automatique la meilleure option dans une liste qu'elle génère, et qui peut être complétée par des options suggérées par l'humain. La machine exécute l'action.
9. Supervision : la machine génère les options, décide et exécute l'action. En revanche, l'humain surveille et peut intervenir s'il le souhaite pour modifier l'option choisie par la machine (basculant alors au niveau "aide à la décision").
10. Automatisation complète : la machine effectue toutes les tâches, et l'humain ne peut pas intervenir.

Selon une approche similaire, Parasuraman et al. (2000) définissent également quatre tâches indépendantes : l'acquisition d'information, l'analyse de l'information, la décision et sélection d'une action, et l'implémentation de l'action. Les auteurs proposent alors une échelle à dix niveaux d'automatisation, inspirée de celle de Sheridan et Verplanck (1978) :

1. La machine n'offre aucune assistance, l'humain doit se charger de toutes les décisions et actions.
2. La machine offre une liste complète d'options possibles.
3. La machine offre une liste réduite d'options.
4. La machine suggère une option.
5. La machine exécute cette option si l'humain approuve.
6. La machine offre pendant un temps limité un droit de veto à l'humain avant l'exécution automatique.
7. La machine exécute l'action automatiquement puis en informe l'humain.
8. La machine exécute l'action automatiquement puis en informe l'humain, uniquement s'il le demande.
9. La machine exécute l'action automatiquement puis en informe l'humain, uniquement si elle le décide.

10. La machine décide et agit automatiquement, en ignorant l'humain.

Selon les auteurs, ces niveaux d'automatisation peuvent être adaptés, moyennant quelques modifications, aux quatre tâches précédemment décrites. Selon la tâche, le nombre de niveaux d'automatisation disponibles peut cependant varier. Un système peut alors posséder des niveaux d'automatisation différents pour chacune de ces tâches.

Hoc et Blosseville (2003) ont proposé une classification selon quatre niveaux d'automatisation (certains divisés en sous-modes, détaillés dans (Hoc et al., 2009; Navarro, 2008)) appliquée au cas des systèmes d'aide à la conduite :

1. Mode perceptif : le système fournit un complément d'information au conducteur dans le but d'améliorer leur perception de l'environnement, par le biais par exemple d'un affichage sur le tableau de bord.
2. Mode contrôle mutuel : le système interprète l'action du conducteur, et intervient lorsqu'elle dépasse une limite de risque prédéfinie. On peut distinguer, au sein de ce mode, quatre sous-modes :
   - Mode avertissement : le système critique l'action du conducteur lors d'un danger imminent. Diverses modalités peuvent alors être utilisées (visuelle, sonore, vibratoire, etc).
   - Mode suggestion d'action : ce mode, proche du mode avertissement, utilise pour alerter le conducteur la modalité haptique sur une commande du véhicule. En fournissant un couple approprié, il suggère ainsi l'action motrice requise. On parle également d'*amorçage moteur* (Navarro et al., 2007).
   - Mode limitatif : ce mode, plus intrusif dans le contrôle du véhicule, offre une résistance à l'action du conducteur. Par exemple, dans le cas d'une assistance au contrôle longitudinal, la pédale d'accélérateur se durcit si le conducteur adopte une vitesse trop élevée.
   - Mode correctif : ce mode participe directement au contrôle du véhicule. Lors d'une sortie de voie par exemple, il va exécuter l'action nécessaire pour le retour du véhicule au centre de la voie. Le conducteur perd ainsi momentanément le contrôle.
3. Mode délégation de fonction : le conducteur délègue de façon durable une partie de la tâche de conduite au système d'aide. Deux sous-modes sont distingués :
   - Mode médiatisé : les actions du conducteur sur les commandes n'agissent pas directement sur le contrôle du véhicule. L'ABS fonctionne selon ce mode : lors d'un freinage d'urgence, le conducteur appuie sur la pédale de frein, mais c'est le système qui régule la force de freinage.
   - Mode régulé : la gestion d'une partie de la tâche de conduite est confiée au système, mais le conducteur dispose d'un moyen de l'activer ou de le désactiver. Par exemple, le régulateur de vitesse, une fois activé, s'occupe totalement de la gestion de la vitesse, selon une vitesse de consigne fixée par le conducteur.
4. Mode automatique : le contrôle longitudinal et latéral est entièrement géré par le système d'aide. Hoc et al. (2009) considèrent deux cas où ce mode peut être utilisé : lorsque le conducteur est incapable de contrôler le véhicule (par exemple, un freinage d'urgence se déclenchant sans aucune action du conducteur), ou quand le risque est très élevé (par exemple, le contrôle latéral dans les tunnels).

La figure 3.6 illustre cette classification.

Human-machine cooperation mode	Perception mode	Mutual control mode		Delegation function mode	Fully automatic mode
Example for lateral control assistance device	Road edges enhancement	Lane departure warning systems (LDWS)	Lane keeping assistance systems (LKAS)	Automatic steering	Automatic pilot

FIGURE 3.6 – Taxonomie des modes de coopération des systèmes d'aide à la conduite proposée par Hoc et al. (2009), appliquée aux systèmes d'aide au contrôle latéral (d'après Navarro et al., 2010).

3.2.2 Les défauts de coopération

Parasuraman et Riley (1997) résument le rapport de l'humain à l'automatisation selon quatre cas :

- L'utilisation (*use*). L'utilisation de l'automatisation a pour but principal de diminuer la charge mentale de l'opérateur, c'est-à-dire le rapport entre la demande cognitive de la tâche à réaliser et les ressources disponibles de l'opérateur (de Waard, 1996). Cette utilisation est grandement dépendante de la confiance que fait l'opérateur au système automatisé.
- La mauvaise utilisation (*misuse*). Une confiance excessive peut pousser l'opérateur à s'appuyer sur l'automatisation sans avoir conscience de ses limites. L'opérateur peut ainsi faillir dans son rôle de supervision du système, et manquer de réagir correctement en cas de dysfonctionnement. Ce phénomène est également appelé complaisance (Parasuraman et Manzey, 2010).
- La non utilisation (*disuse*). A l'inverse, un opérateur ne faisant pas confiance à un système va le désactiver ou l'ignorer, même si ce système pourrait s'avérer primordial dans certaines situations critiques.
- L'abus (*abuse*). Sous le terme d'abus de l'automatisation, les auteurs considèrent la conception et l'implémentation de l'automatisation, sans prise en compte de ses effets sur la performance de l'opérateur et sur son autorité sur le système.

Comme nous le voyons ici, la confiance est un fondement essentiel de la coopération Homme / machine. Comme la définissent Lee et See (2004), la confiance est le sentiment qu'un agent aidera à la réalisation des objectifs de l'individu, dans une situation caractérisée par l'incertitude et la vulnérabilité. Dans le cas d'un système d'aide à la conduite, la confiance peut être influencée par les dysfonctionnements du système. Abe et Richardson (2004) ont par exemple observé que la confiance des conducteurs en un système FCW diminuait lors de dysfonctionnements (fausses alertes et absences de déclenchement). Abe et al. (2002) ont également montré, toujours avec un système FCW, que la confiance diminuait quand le temps de déclenchement du système

augmentait. En présence d'un affichage sur le tableau de bord, la confiance dans le système peut également dépendre de l'apparence du système (Barthou, 2011).

Cette confiance du conducteur envers un système d'aide détermine son acceptation et donc son utilisation du système (Lee et See, 2004). Sullivan et al. (2008) ont par exemple montré que lorsque la fiabilité d'un système LDW diminuait, le temps de réaction des conducteurs à ses alertes augmentait, suggérant ainsi que les conducteurs tendaient davantage à les ignorer. Un questionnaire, développé par van der Laan et al. (1997), permet de mesurer l'acceptation d'un système d'aide par les conducteurs selon deux dimensions : l'utilité et la satisfaction.

Adaptation comportementale

Comme le souligne Smiley (2000), l'unique observation de la tâche pour laquelle le conducteur est assisté est insuffisante, car l'adaptation comportementale (voir section 2.5) suggère que le conducteur adopte un compromis entre la mobilité et la sécurité. Un système d'aide apportant une amélioration de la sécurité selon un aspect de la conduite pourrait ainsi entraîner une augmentation du risque selon d'autres aspects.

A travers leur modèle qualitatif de l'adaptation comportementale (voir figure 3.7), Rudin-Brown et Noy (2002) insistent sur le rôle déterminant de la confiance du conducteur, précédemment discuté. Cette confiance est dépendante de certains traits de personnalité (le locus de contrôle, c'est-à-dire la tendance à lier les événement rencontrés à des causalités externes ou internes, ainsi que la tendance à la recherche de sensations), et également du feedback que reçoit le conducteur. Ce feedback peut être direct via l'expérience de conduite (via par exemple la fiabilité perçue), ou inféré, via des informations recueillies dans les médias, la publicité, ou auprès d'amis. Cette confiance va alors modifier le modèle mental que se fait le conducteur du véhicule (et par extension, des systèmes d'aide à la conduite), et éventuellement influencer le comportement de conduite par le phénomène d'adaptation comportementale.

Les auteurs ont réalisé une expérimentation sur piste et sur simulateur, où les participants devaient conduire avec un système LDW tout en réalisant une tâche secondaire. Ils ont rapporté le comportement de certains conducteurs qui, se reposant sur le système qui les aidait à rester sur leur voie, ont altéré leur stratégie de conduite afin de mieux répondre à la tâche secondaire.

De même, Rudin-Brown et Parker (2004) ont observé, lors d'une expérimentation sur piste, que des conducteurs utilisant un système ACC arrivaient à répondre à une tâche secondaire plus rapidement que ceux conduisant sans assistance, mais se montraient moins rapides pour détecter le freinage du véhicule les précédant.

Hoedemaeker et Brookhuis (1998) ont observé, lors d'une expérimentation sur simulateur de conduite, que les conducteurs utilisant un système ACC avaient tendance à conduire plus vite que ceux n'utilisant pas le système. Les auteurs ont également remarqué que lors d'un dépassement, les sujets avec ACC restaient plus longtemps sur la voie de gauche, confirmant ainsi un résultat

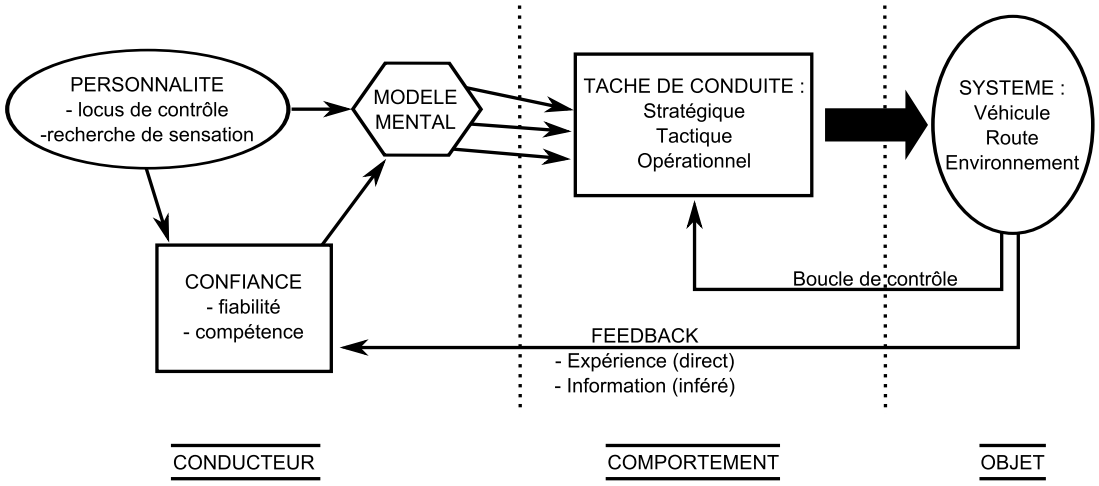


FIGURE 3.7 – Modèle qualitatif de l'adaptation comportementale (adapté de Rudin-Brown et Noy (2002)).

obtenu par Nilsson (1995).

Stanton et Pinto (2000) ont étudié, sur un simulateur de conduite, la vitesse des conducteurs avec un système d'aide à la vision dans le brouillard (affichage de la route sur le pare-brise, voir figure 3.8). Les auteurs ont observé, tout d'abord, une diminution de la vitesse moyenne dans le brouillard par rapport à la conduite de jour. En introduisant le système d'aide, les conducteurs ont en revanche augmenté leur vitesse, la ramenant quasiment à la vitesse de conduite de jour. Les auteurs ont ensuite simulé un dysfonctionnement du système (le système bloquait totalement le champ de vision des conducteurs, les forçant à le désactiver). Les conducteurs ont donc diminué leur vitesse à nouveau, adoptant alors une vitesse plus faible que lors de la conduite dans le brouillard sans système d'aide.

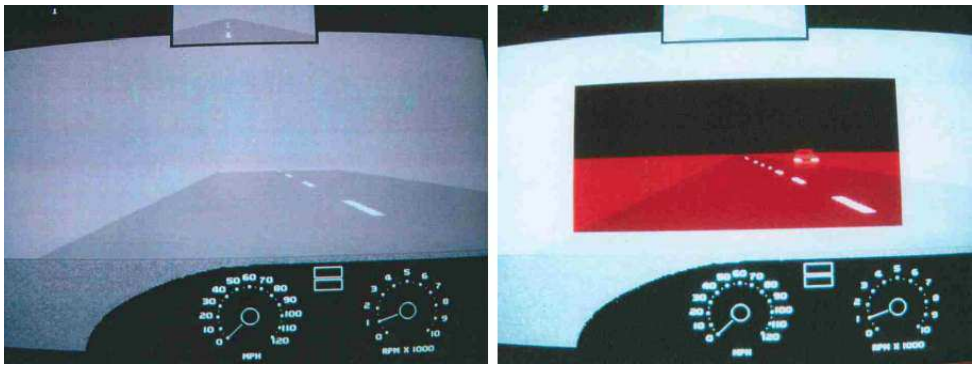


FIGURE 3.8 – Sistème d'aide à la vision dans le brouillard : à gauche sans, à droite avec (tiré de Stanton et Pinto (2000)).

Comte (2000) a observé le comportement de conducteurs assistés d'un système ISA limitant

la vitesse du véhicule. L'auteur a constaté chez ces sujets une diminution de l'écart accepté pour s'insérer entre deux véhicules, ainsi qu'une diminution de la distance de suivi de véhicule. L'auteur suggère que les conducteurs essayaient ainsi de compenser une augmentation perçue du temps de trajet (bien que ce n'était effectivement pas le cas).

Difficulté de reprise du contrôle

Dans le cas d'un niveau d'automatisation élevé, peut se poser le problème de l'opérateur se retrouvant "hors de la boucle" de contrôle (Endsley et Kiris, 1995; Kaber et Endsley, 1997). En raison d'une interaction limitée avec le système, l'opérateur a une conscience réduite de l'état du système. Il peut alors éprouver des difficultés à reprendre le contrôle lorsque nécessaire (temps de réaction plus important, ou inaptitude à effectuer l'action adéquate), lors par exemple d'une défaillance de la machine.

Hoc et al. (2006) ont observé de telles difficultés avec un système d'aide au contrôle latéral utilisant le mode délégation de fonction. Lors d'une expérimentation sur piste, un obstacle apparaissait sur la voie, et pour l'éviter, les conducteurs devaient reprendre le contrôle sur le système en tournant le volant. Les auteurs ont constaté, avec le système d'aide, une réponse des conducteurs à la fois plus tardive et plus brusque.

Nilsson (1995) a réalisé une expérimentation sur simulateur de conduite, avec un groupe de sujets utilisant un système ACC ainsi qu'un groupe contrôle. Les conducteurs rencontraient une file de véhicules arrêtés et devaient effectuer un freinage d'urgence. Les auteurs ont rapporté que les conducteurs utilisant l'ACC ont initié le freinage plus tardivement que les conducteurs non assistés. En outre, sur les vingt participants, quatre sujets avec ACC sont entrés en collision avec le dernier véhicule de la file, contre un seul non assisté.

Distraction

Les systèmes d'aide à la conduite peuvent également générer de la distraction chez le conducteur, au même titre que toute technologie utilisée dans le véhicule : l'autoradio, un téléphone, etc (Lee, 2009). De nombreuses définitions de la distraction existent dans la littérature, mais peuvent néanmoins être résumées ainsi : la distraction est le détournement de l'attention sur un objet, une personne ou un événement extérieur à la tâche de conduite (ou non primordial pour la sécurité de la conduite), qui implique une baisse des performances du conducteur (Lee et al., 2009). On peut cependant distinguer quatre types de distraction (Kircher, 2007) : la distraction visuelle (regard porté ailleurs que sur la route), la distraction auditive (par exemple, réagir à une sonnerie de téléphone), la distraction biomécanique (par exemple, changer un CD) et la distraction cognitive (par exemple, être perdu dans ses pensées).

L'étude de la distraction ne constitue pas l'objet principal de cette thèse. En revanche, il est

important de noter que dans les études portant sur les systèmes d'aide à la conduite, les tâches secondaires sont très souvent utilisées (voir un exemple figure 3.9). Elles sont en effet un moyen d'introduire artificiellement de la distraction chez les sujets d'une expérimentation, en leur faisant réaliser une tâche annexe à la conduite. Plusieurs types de tâches secondaires sont alors possibles, créant différents types de distraction. Ces tâches permettent de se rapprocher davantage de conditions de conduite réelles, ou du moins des plus critiques, et d'atténuer la concentration accrue qu'adoptent généralement les sujets sachant qu'ils participent à une expérimentation. De plus, les cas de distraction des conducteurs représentent les situations dans lesquelles les systèmes d'aide à la conduite se trouvent particulièrement utiles, et donc généralement plus utilisés.

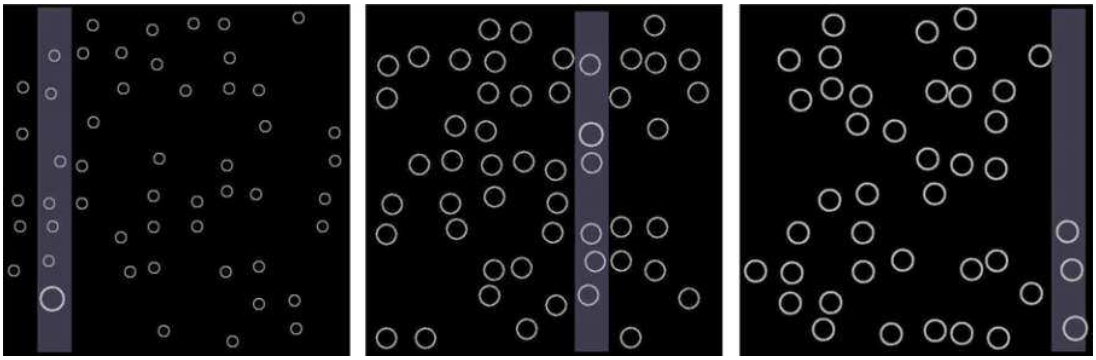


FIGURE 3.9 – Exemple de tâche secondaire : la *Surrogate Reference Task* (Mattes et Hallén, 2009) : les sujets doivent placer un curseur sur le cercle le plus gros. La tâche montre ici trois différents niveaux de difficulté : facile à gauche, moyen au milieu et difficile à droite (tiré de Petzoldt et al. (2011)).

La tâche secondaire est aussi un moyen de mesurer la charge mentale des conducteurs générée par la tâche de conduite, ou du moins de la comparer entre plusieurs groupes : plus leur charge mentale est élevée, plus leur performance à la tâche secondaire est dégradée (Sanders, 1979; de Waard, 1996).

Chapitre 4

La simulation de conduite

4.1 Presentation

Le développement des simulateurs de conduite a commencé dans les années 1960, avec le Sensorama (voir figure 4.1). Ce simulateur permettait de visualiser une motocyclette se déplaçant dans les rues de Brooklyn, et proposait déjà une restitution multi-sensorielle : son stéréophonique, image couleur stéréoscopique, odeurs, vent et vibrations. Il ne permettait néanmoins pas la conduite interactive.

Avec l'apparition de l'informatique, l'interactivité est apparue et les simulateurs de conduite se sont complexifiés. Si, au départ, l'interactivité se limitait à faire varier la vitesse de défilement d'un film vidéo, les simulateurs d'aujourd'hui permettent de conduire véritablement comme dans un véhicule réel. Les simulateurs de conduite automobile ont bénéficié de l'expérience du développement des simulateurs de vol, plus anciens. Ils répondent néanmoins à une problématique bien distincte, de part les caractéristiques de la tâche de conduite (telles qu'exposées dans le premier chapitre) ainsi que de la dynamique du véhicule, qui diffèrent énormément de celles d'un avion.

La technologie de simulation de conduite est aujourd'hui grandement utilisée dans la recherche et l'industrie. Elle permet d'observer le comportement de conducteurs dans une très grande variété de situations, en facilitant les mesures et en garantissant la sécurité des conducteurs.

4.1.1 Restitution visuelle

La restitution visuelle dans un simulateur de conduite se fait grâce aux dispositifs d'affichage classiques utilisés en réalité virtuelle (Fuchs et al., 2006) : écrans multi-faces ou cylindriques sur lesquels l'image est projetée à l'aide de vidéoprojecteurs, écrans LCD, ou, plus rarement, casques



FIGURE 4.1 – Le simulateur Sensorama (Heilig, 1962).

de réalité virtuelle (Coates et al., 2002).

En conduite, la vision périphérique joue un rôle essentiel, notamment pour la perception de la vitesse. Le champ de vision horizontal est donc un paramètre majeur à prendre en compte dans la construction d'un simulateur de conduite. Kemeny et Panerai (2003) suggèrent ainsi qu'un minimum de 120° de champ de vision horizontal est nécessaire. Un champ de vision supérieur est souvent utilisé, pour une meilleure immersion.

4.1.2 Restitution haptique

Afin de recréer le ressenti des commandes d'un véhicule réel, les simulateurs embarquent généralement des moteurs capables de restituer un couple d'effort au niveau des pédales et du volant. Pour le volant en particulier, le logiciel doit intégrer un modèle de retour d'effort dépendant de l'angle volant (Toffin et al., 2007), afin de recréer artificiellement la résistance du volant (voir 2.1.3). Bertollini et Hogan (1999) ont également montré que les conducteurs préféraient un retour d'effort qui augmente avec la vitesse.

4.1.3 Interface

Pour les simulateurs de conduite les plus simples, le contrôle du véhicule peut se faire avec un simple volant de type jeu vidéo. Dans les simulateurs plus avancés en revanche, la cabine intègre une véritable planche de bord de véhicule et même parfois un véhicule réel, pour un réalisme accru.

4.1.4 Restitution de mouvements

Certains simulateurs proposent une restitution de mouvements, ou restitution inertielle. Ils sont appelés simulateurs dynamiques (par opposition aux simulateurs statiques ne restituant aucun mouvement). Pour cela, ils utilisent une plateforme mécanique dite de Gough-Stewart (voir figure 4.2). Ces plateformes relient un plateau mobile, la nacelle, à un plateau fixe, la base, par l'intermédiaire de vérins. Ces vérins permettent le déplacement ainsi que la rotation de la cabine selon les trois directions et les trois rotations de l'espace. On parle ainsi de plateforme à six degrés de liberté, ou hexapode.



FIGURE 4.2 – Plateforme de Gough-Stewart (source : CAR&D).

Afin de compenser le faible débattement des plateformes, la restitution inertielle sur les simulateurs utilise la technique de *tilt coordination*, ou récupération de gravité. Elle consiste à mettre à profit l'ambiguïté sensorielle des organes otolithiques confondant une accélération linéaire et une orientation (voir 2.1.2). Pour cela, la plateforme est inclinée afin qu'une composante de la gravité soit interprétée par les organes otolithiques comme une accélération linéaire, et provoque ainsi l'illusion du mouvement du véhicule.

Sur certains simulateurs, la base de la plateforme est également fixée sur un système de rails se déplaçant longitudinalement et/ou latéralement, afin de restituer des déplacements de plus grande amplitude.

4.1.5 Logiciel

La partie logicielle des simulateurs de conduite est complexe et comprend de nombreux modules, dont les principaux sont les suivants :
- Superviseur. Ce module permet, depuis le poste de commande, de lancer la simulation, l'arrêter, ainsi que surveiller son déroulement.
- Restitution visuelle. Ce module gère l'affichage 3D de la scène visuelle.
- Restitution sonore. Ce module gère la restitution sonore de l'environnement, et intègre un modèle pour simuler le bruit du moteur.
- Gestion de trafic. Ce module génère les véhicules du trafic et intègre un modèle de comportement pour les déplacer de façon autonome.
- Gestion des scénarios. Ce module permet de créer et exécuter des scénarios, permettant le déclenchement d'évènements spécifiques pendant la simulation.
- Enregistreur. Ce module permet d'enregistrer les données de la conduite (vitesse du véhicule, angle au volant, etc) en vue de son analyse ultérieure.
- Acquisitions. Ce module gère la communication avec le matériel embarqué dans le simulateur. Son rôle est de recevoir les informations du poste de conduite (angle volant, enfoncement des pédales, rapport de boîte de vitesse, état des clignotants, etc) aussi bien que d'en envoyer pour leur affichage sur le tableau de bord (vitesse, état des systèmes d'aide à la conduite, etc).
- Modèle dynamique. Ce module intègre un modèle de comportement de véhicule, et permet de simuler sa réponse en fonction des actions du conducteur. Ce module intègre également un modèle de retour d'effort volant, ainsi que certains systèmes d'aide à la conduite comme l'ESP.
- Contrôle commande (ou *motion cueing*). Pour les simulateurs dynamiques, ce module permet de piloter les mouvements de la plateforme et/ou des rails, en fonction du comportement du véhicule simulé (Dagdelen, 2005). Ce module est également accompagné d'un programme de sécurité permettant d'interrompre la simulation en cas de déverrouillage d'un équipement de sécurité (passerelle d'accès, portillon, ceinture de sécurité, etc).

Ces différents modules sont gérés par un logiciel de simulation. Nous pouvons citer entre autres le logiciel SCANeR© distribué par la société Oktal, Sherpa développé par PSA, Vires développé par VIRES Simulationstechnologie GmbH, ou encore le logiciel open-source OpenSD2S (Filliard et al., 2010).

Ces logiciels intègrent généralement plusieurs des modules pré-cités, mais peuvent également communiquer avec des modules tiers. En effet, des modules externes sont souvent utilisés, notamment pour le modèle dynamique (comme LMS AMESim, CarMaker, ou MADA de Renault) ou la restitution sonore (comme Genesis). Les acquisitions et le contrôle commande nécessitent également un développement spécifique, en raison de leur dépendance au matériel utilisé.

4.2 Les simulateurs de conduite dans le monde

4.2.1 Simulateurs statiques

Parmi les simulateurs plus simples, également appelés *low-cost*, nous pouvons citer :
- Le simulateur Eco^2, développé par Oktal et Renault (figure 4.3 (a)), destiné à la formation des conducteurs à l'éco-conduite
- Le simulateur de l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes) de l'école centrale de Nantes (figure 4.3 (b))

Ces simulateurs présentent l'avantage d'être peu coûteux, et faciles à transporter.



FIGURE 4.3 – Simulateurs *low-cost* : (a) simulateur Eco^2 Oktal-Renault (source : Oktal), (b) simulateur de l'IRCCyN (source : Denoual et al. (2011)).

Les simulateurs statiques plus avancés intègrent un véhicule entièrement instrumenté placé devant un grand écran courbe ou multi-facettes. Nous pouvons citer par exemple :
- Le simulateur SIM^2 de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). Il est composé d'un véhicule (Citroën Xantia) placé devant un écran à trois faces, pour un angle de vision de 150° (Auberlet et al., 2010; Espié et al., 2005) (figure 4.4 (a)).
- Le simulateur du Fraunhofer IAO (Allemagne), constitué d'un véhicule (Renault Scenic) ainsi que d'un écran avant à trois faces offrant un champ de vision de 180° et de deux écrans arrières (Marberger, 2008) (figure 4.4 (b)).
- Le simulateur statique de l'université de Leeds (Angleterre), constitué d'un véhicule (Rover 216) et d'un écran courbe offrant un champ de vision de 120° (Blana et Golias, 2002) (figure 4.4 (c)).

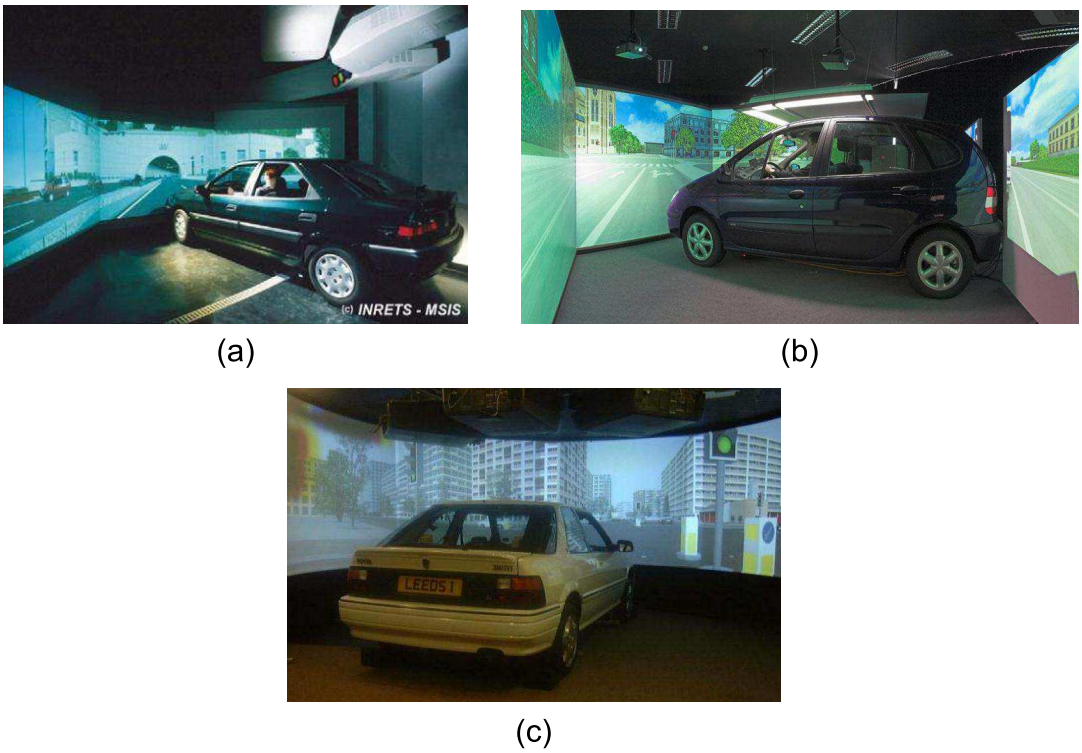


FIGURE 4.4 – Simulateurs statiques : (a) simulateur SIM^2 de l'IFSTTAR (source : Auberlet et al. (2010)), (b) simulateur du Fraunhofer IAO (source : ve.iao.fraunhofer.de), (c) simulateur statique de l'université de Leeds (source : Jamson et Smith (2003)).

4.2.2 Simulateurs dynamiques

De très nombreux simulateurs dynamiques intègrent la restitution des mouvements. Nous pouvons citer entre autres :

- Le simulateur SHERPA de PSA Peugeot-Citroën, également présent au LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines) de l'université de Valenciennes (figure 4.5 (a)). Le simulateur est constitué d'un véhicule (Peugeot 206) monté sur une plateforme Rexroth Hydraudyne, et d'un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180° (Younsi et al., 2009).
- Le simulateur VERA du laboratoire TEST (Technology Environment Safety Transport) de l'université de Naples (Italie) (figure 4.5 (b)). Il est constitué d'une moitié de véhicule (Citroën C2) montée sur une plateforme à six degrés de liberté et placée face à un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180°. Des écrans LCD placés dans les rétroviseurs central et extérieurs permettent la vision arrière (Torrieri et al., 2008).
- Le simulateur avancé du CARRS-Q (Centre for Accident Research and Road Safety) de l'université du Queensland (Australie) (figure 4.5 (c)) est constitué d'un véhicule (Holden VE Calais) placé sur une plateforme Rexroth et d'un écran à trois faces offrant un champ de vision de 180°. Des écrans LCD placés dans les rétroviseurs central et extérieurs permettent la vision arrière (Haines, 2011).
- Le simulateur KMUDS-4 de l'université de Kookmin (Corée) (figure 4.5 (d)), constitué d'un véhicule, d'un écran frontal à trois faces offrant un champ de vision de 140° et d'un écran arrière offrant un champ de vision de 50°. La restitution de mouvements est réalisée grâce à quatre moteurs électriques situés sous le véhicule (Lee et al., 2007).
- Le simulateur avancé du CTAG (Centro Tecnológico de Automoción de Galicia, Espagne) (figure 4.5 (e)). Un véhicule (Citroën C5) est placé dans une cabine fermée, contenant un écran frontal cylindrique offrant un champ de vision de 180° et trois écrans arrière, et montée sur une plateforme à six degrés de liberté. (Paul Tomillo et al., 2009).
- Le simulateur VIRTTEX de Ford (figure 4.5 (f)). Un véhicule est placé dans un dôme contenant un écran cylindrique frontal offrant un champ de vision de 180° et un écran cylindrique arrière offrant un champ de vision de 120° (Artz et al., 2001). Le dôme est monté sur une plateforme à six degrés de liberté.

Afin de reproduire des déplacements de plus grande amplitude, les simulateurs dynamiques peuvent également, en plus d'une plateforme à six degrés de liberté, être placés sur rails. Ces rails peuvent permettre un déplacement selon une ou deux dimensions. Pour les systèmes à une dimension, citons par exemple :

- Le simulateur MARS de l'IFAS (Institut für Fahrzeugtechnik und Antriebssystemtechnik, Allemagne). Le rail permet un déplacement latéral de 1.5 m (Breidenbach et Tomaske, 2004) (figure 4.6 (a)).
- Le simulateur III du VTI (Institut national de recherche sur la route et les transports, Suède). Le rail permet un déplacement de 7.5 m (figure 4.6 (b)). La cabine possède la particularité de pouvoir s'orienter de 90°, afin d'utiliser le rail pour reproduire des mouvements longitudinaux ou latéraux (Nordmark et al., 2004).

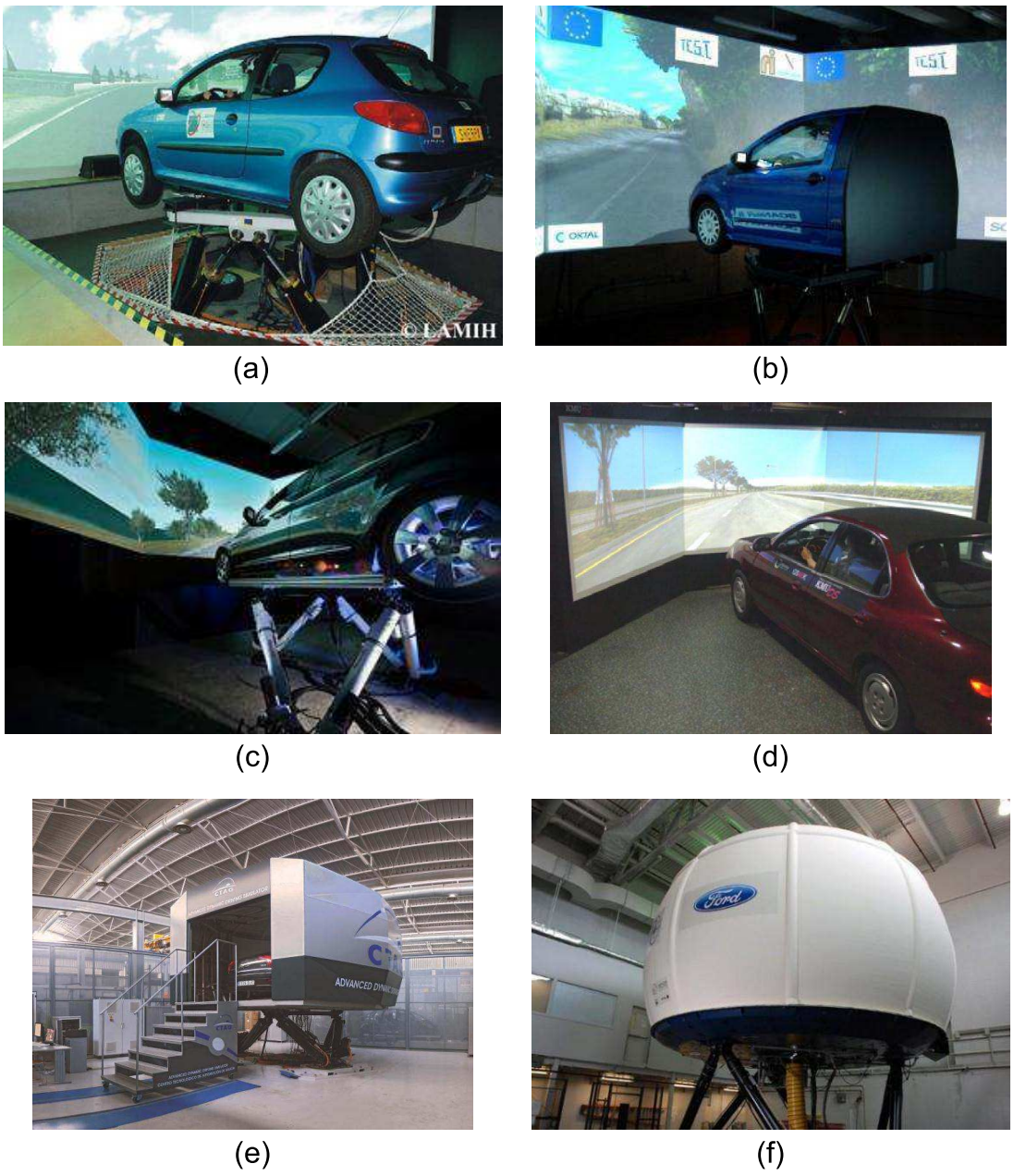


FIGURE 4.5 – Simulateurs dynamiques : (a) simulateur SHERPA du LAMIH (source : Auberlet et al. (2010)), (b) simulateur VERA du TEST (source : Galante et al. (2010)), (c) le simulateur du CARRS-Q (source : carrsq.qut.edu.au), (d) simulateur KMUDS-4 de l'université de Kookmin (source : Lee et al. (2007)), (e) simulateur du CTAG (source : ctag.com), (f) simulateur VIRTTEX de Ford (source : fordauthority.com).

– Le simulateur dynamique de Daimler (Allemagne) (figure 4.6 (c)), constitué d'un dôme contenant un véhicule et un écran cylindrique de 360°, monté sur une plateforme à six degré de liberté et un rail permettant une amplitude de mouvement de 12 m (Zeeb, 2010). La cabine s'oriente également de 90° afin d'utiliser le rail en longitudinal ou en latéral.

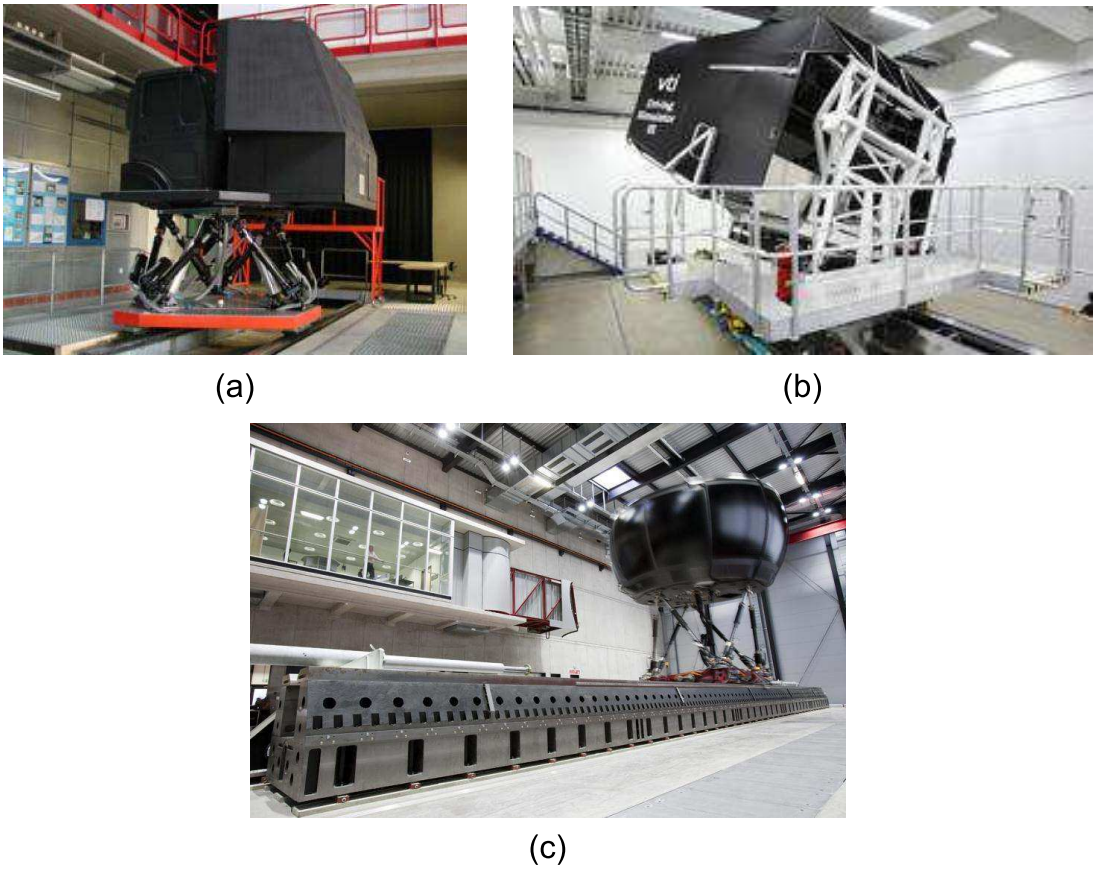


FIGURE 4.6 – Simulateurs dynamiques avec rail à une dimension : (a) le simulateur MARS de l'IFAS (source : hsu-hh.de), (b) le simulateur III du VTI (source : vti.se), (c) le simulateur dynamique de Daimler (source : daimler.com).

Parmi les simulateurs possédant un système de rails permettant le déplacement selon deux dimensions, nous pouvons citer :
– Le simulateur dynamique de l'université de Leeds (Angleterre) (figure 4.7 (a)). Les rails permettent un déplacement de 5 m en longitudinal et en latéral.
– Le simulateur de l'université de Tongji (Chine) (figure 4.7 (b)). Les rails permettent un déplacement de 20 m en longitudinal et de 5 m en latéral.
– Le simulateur NADS-1 de l'université d'Iowa (Etats-Unis) (figure 4.7 (c)). Les rails permettent un déplacement de 19.5 m en longitudinal et en latéral (Greenberg et al., 2006). La cabine embarque un écran cylindrique de 360°.
– Le simulateur dynamique de Toyota (figure 4.7 (d)). Les rails permettent un déplacement de

35 m en longitudinal et de 20 m en latéral.

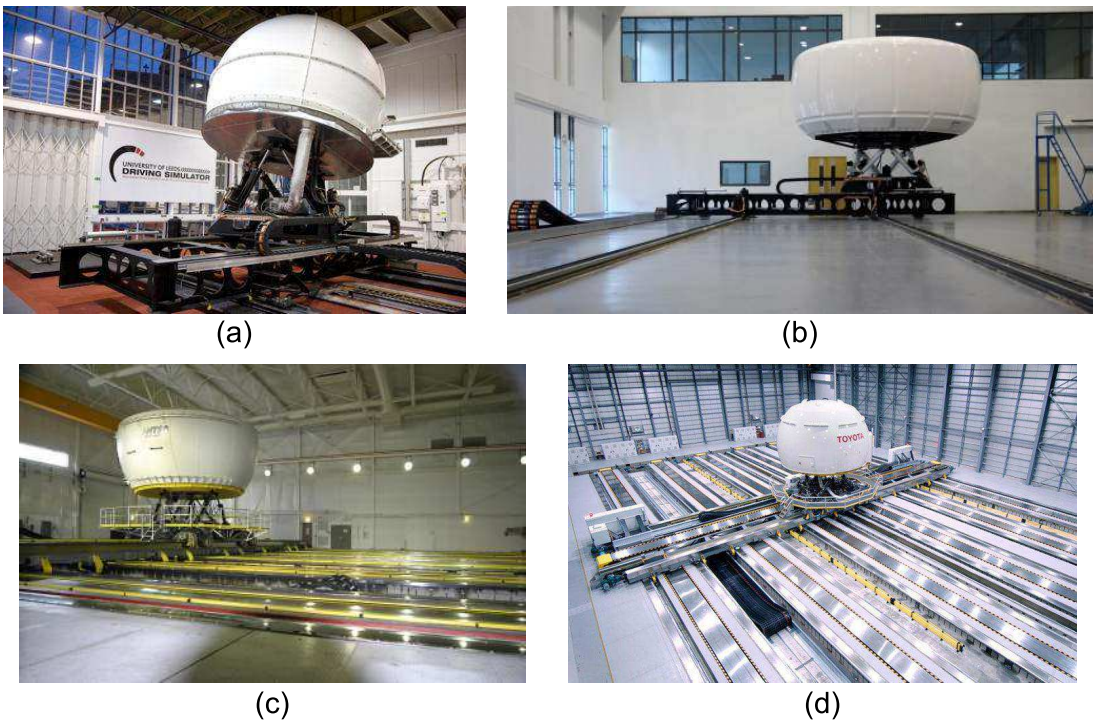


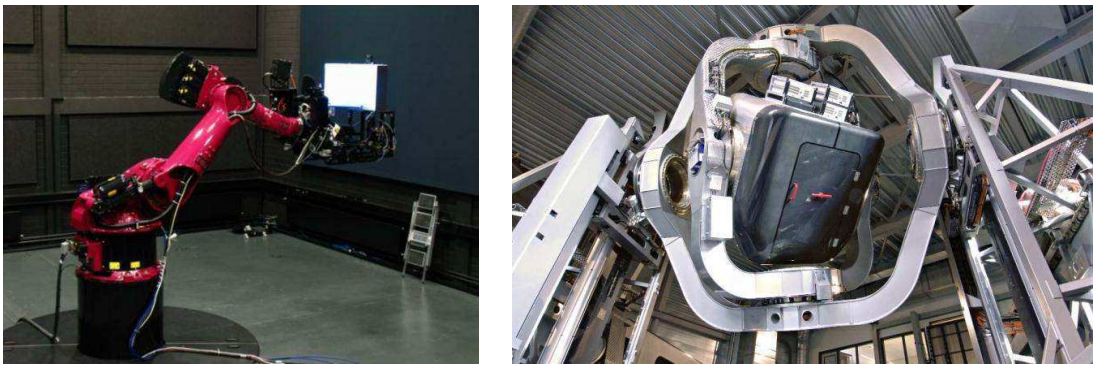
FIGURE 4.7 – Simulateurs dynamiques avec rails à deux dimensions : (a) le simulateur dynamique de l'université de Leeds (source : its.leeds.ac.uk), (b) le simulateur de l'université de Tongji (source : vectioneer.com), (c) le simulateur NADS-1 de l'université d'Iowa (source : nads-sc.uiowa.edu), (d) le simulateur de Toyota (source : motortrend.com).

Enfin, certains simulateurs dynamiques utilisent une architecture spécifique pour la restitution de mouvements :

– Le simulateur CyberMotion du MPI (Max Planck Institute, Allemagne) (figure 4.8 (a)). Il utilise un robot anthropomorphe à six degrés de liberté, sur lequel un poste de conduite et un écran courbe ont été installés (Grabe et al., 2010).
– Le simulateur Desdemona du TNO (Organisation pour la recherche appliquée, Pays-Bas) (figure 4.8 (b)). Il consiste en un système de type centrifugeuse, initialement destiné à l'entraînement à la désorientation, qui a été adapté à la simulation de conduite (Mayrhofer et al., 2009).

4.3 Les simulateurs de conduite du CTS

Le CTS (Centre Technique de Simulation, voir 1.3.2) de Renault possède plusieurs simulateurs de conduite, destinés aux essais de différents métiers de l'entreprise. Tous ces simulateurs utilisent le logiciel SCANeR©, distribué par la société Oktal, ainsi que MADA, le modèle dynamique



(a) (b)

FIGURE 4.8 – Simulateurs dynamiques utilisant une architecture spécifique : (a) le simulateur Kuka du MPI (source : Grabe et al. (2010)), (b) le simulateur Desdemona du TNO (source : tno.nl).

propriétaire de Renault (voir 4.1.5).

4.3.1 Simulateurs statiques

Simulateur d'éclairage

Le simulateur d'éclairage (voir figure 4.9) est un simulateur statique, composé d'un véhicule (Renault Scenic) entièrement instrumenté, et équipé d'une boîte de vitesse automatique. La scène visuelle est projetée sur un écran cylindrique à l'aide de trois vidéoprojecteurs, offrant un angle de vision total de 210° horizontalement, et 35° verticalement.

Ce simulateur est utilisé notamment pour valider la visibilité de la route en conduite de nuit. Il a ainsi permis de s'affranchir du prototypage physique des optiques lors de la phase de conception des véhicules.

Le CTS possède également d'autres simulateurs statiques, comme le simulateur MV2I, simulateur modulaire servant pour l'évaluation d'interfaces de tableau de bord. Des postes de conduite plus simples, intégrant un volant de type jeu vidéo, sont également utilisés afin de libérer les simulateurs lors des phases de mise au point des simulations (intégration de modèles spécifiques, développement de scénarios, etc).



FIGURE 4.9 – Simulateur d'éclairage.

4.3.2 Simulateurs dynamiques

Cards2

Le simulateur Cards2 (voir figure 4.10) est composé d'une cabine équipée d'une planche de bord de Renault Mégane instrumentée, intégrant une boîte de vitesse manuelle à cinq rapports. L'image est projetée sur trois écrans, offrant un angle de vision de 150° horizontalement et 40° verticalement. Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran central. Le simulateur est monté sur une plateforme à six degrés de liberté, permettant un déplacement de ± 20 cm et une rotation de ± 20°. Pour une description plus complète du simulateur, voir Reymond et Kemeny (2000).



FIGURE 4.10 – Le simulateur Cards2.

Ultimate

Le simulateur Ultimate (voir figure 4.11) est constitué d'une cabine équipée d'une planche de bord de Renault Laguna complète. Le volant est équipé d'un système de retour d'effort actif (*i.e.* utilisant un moteur électrique), et les pédales ainsi que le levier de vitesses sont équipés d'un système de retour d'effort passif (*i.e.* utilisant des ressorts et amortisseurs). L'image est projetée sur un écran cylindrique offrant un champ de vision de 150° horizontalement et 40° verticalement.

Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran principal. Les mouvements du véhicule sont restitués à l'aide d'une plateforme à six degrés de liberté, se déplaçant longitudinalement et latéralement sur des rails offrant une amplitude de déplacement de 7 m par 7 m. Pour une description plus complète du simulateur, voir Dagdelen et al. (2006).

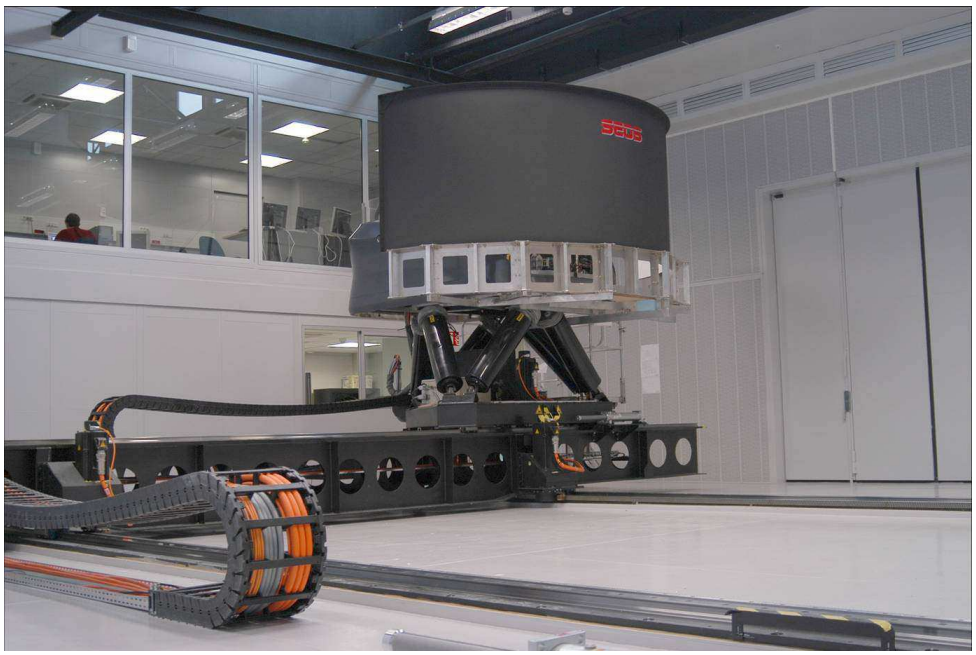


FIGURE 4.11 – Le simulateur Ultimate.

4.4 Le simulateur de conduite du Le2i

Le Le2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image, voir 1.3.1) possède également un simulateur de conduite. Le simulateur SAAM (voir figure 4.12) est constitué d'un véhicule (Renault Twingo) monté sur une plateforme à six degrés de liberté. L'image est projetée sur un écran cylindrique offrant un champ de vision de 150°. Pour une description plus complète du simulateur, voir Colombet et al. (2010).



FIGURE 4.12 – Le simulateur SAAM.

4.5 Validité des simulateurs

4.5.1 Comparaison entre simulation et réalité

Dans l'optique d'utiliser les simulateurs de conduite pour observer le comportement des conducteurs, la question de validité de l'outil se pose : dans quelle mesure les résultats obtenus sur simulateur sont-ils applicables à la conduite sur véhicule réel ?

De nombreuses études ont comparé le comportement des conducteurs sur simulateur et sur véhicule réel. Plusieurs auteurs se sont par exemple intéressés à la tâche de freinage, et ont montré que les conducteurs commençaient à freiner plus tard sur un simulateur que sur un véhicule réel (Kaptein et al., 1996; Cavallo, 1999; Brünger-Koch et al., 2006). Brünger-Koch et al. (2006) suggèrent que ce comportement est dû à une sous-estimation de la vitesse. Les expérimentations menées par Boer et al. (2000) et Marberger (2008) ont également montré que lors du freinage, la décélération maximale était plus forte sur simulateur que sur véhicule réel.

Marberger (2008) a également observé des différences lors de prises de virage aux intersections : les corrections au volant étaient plus nombreuses sur simulateur que sur véhicule réel. L'auteur rapporte par contre que les performances pour le maintien du véhicule sur sa voie, tout en réalisant une tâche distractive, étaient comparables entre simulation et réalité. Blana et Golias

(2002) ont en revanche observé entre la conduite sur véhicule réel et sur simulateur statique, des différences sur l'écart latéral : celui-ci était plus faible et de plus grande variabilité sur le simulateur.

Guzek et al. (2006) se sont intéressés aux manœuvres d'urgence, et ont étudié la réaction des conducteurs lorsqu'un véhicule surgissait subitement sur la droite de la route, sur un véhicule réel et sur un simulateur statique. Les auteurs ont observé sur simulateur une proportion plus importante de sujets décidant de freiner que sur véhicule réel, mais des temps de réaction très comparables entre les deux situations. Greenberg et al. (2006) ont en revanche observé des temps de réaction différents, pour des manœuvres de freinage et de dépassement d'urgence, entre un véhicule réel et deux simulateurs statiques.

4.5.2 La notion de validité

Dans l'optique d'étudier un simulateur de conduite pour observer le comportement des conducteurs, son domaine de validité doit être soigneusement étudié. Mudd (1968) définit la validité d'un simulateur comme la capacité de reproduire un environnement comportemental. Selon Leonard et Wierwille (1975), la validation d'un simulateur passe par un ajustement des conditions expérimentales afin d'obtenir une correspondance entre les mesures effectuées en simulation et en réalité.

Blaauw (1982) distingue deux niveaux de validité, qui ne sont pas nécessairement reliés : la validité physique et la validité comportementale. La validité physique concerne la correspondance quantifiée entre les caractéristiques physiques du simulateur et du véhicule réel (dynamique du véhicule, stimuli sensoriels). Elle est équivalente à la notion de fidélité (Godley et al., 2002). La validité comportementale représente la correspondance entre le comportement observé en conduite réelle et en simulation. Elle est également appelée validité prédictive (Godley et al., 2002) ou validité par objectif (Espié et al., 2005).

Blaauw (1982) précise que la validité comportementale peut être absolue ou relative (voir figure 4.13). Une validité absolue signifie que les grandeurs mesurées sont à peu près égales entre la réalité et la simulation. Une validité relative signifie que les différences de performances entre différentes conditions expérimentales sont de même ordre et de même direction sur simulateur que sur un véhicule réel.

Kaptein et al. (1996) précisent que pour qu'un simulateur soit considéré comme valide, tous les éléments de la simulation n'ont pas forcément besoin d'être identiques à la réalité. En revanche, les indices sensoriels essentiels pour la tâche étudiée se doivent d'être valides. En outre, Törnros (1998) suggère que, pour qu'un simulateur soit un outil de recherche efficace, la validité absolue n'est pas nécessaire mais la validité relative est indispensable.

Malaterre et Fréchaux (2001) ont complété la définition de la validité, et en ont distingué quatre niveaux :

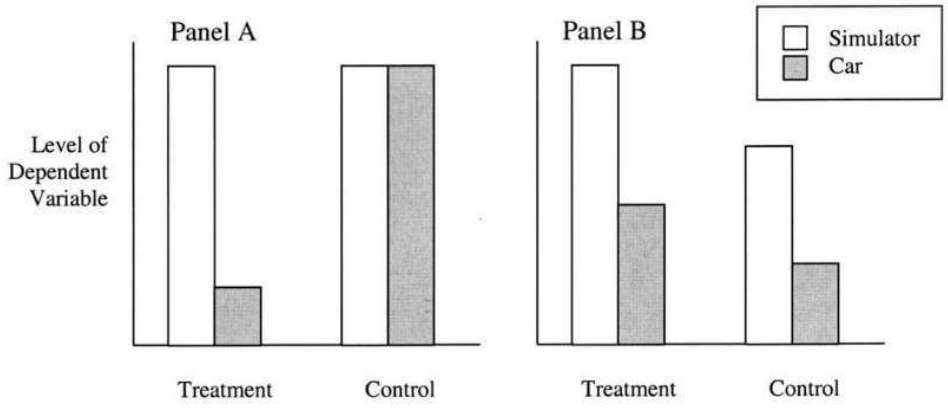


FIGURE 4.13 – Exemples hypothétiques : le panel A présente une validité absolue pour le groupe de contrôle, mais pas de validité relative pour l'effet du traitement ; au contraire, le panel B ne présente pas de validité absolue, mais une validité relative pour l'effet du traitement (tiré de Godley et al. (2002)).

- La validité physique, représentant la fidélité des stimuli que reçoivent les conducteurs
- La validité expérientielle, décrivant l'évaluation subjective par les conducteurs de la ressemblance entre la situation simulée et la réalité (proche de la notion de réalisme)
- La validité éthologique, concernant la similitude des comportements observés entre réalité et simulation
- La validité psychologique, définissant la similitude entre les mécanismes cognitifs des conducteurs entre réalité et simulation (rythme cardiaque, coût cognitif, etc).

Jamson et Smith (2002) ajoutent à cela le concept de validité émotionnelle, concernant la similarité des états émotionnels ressentis par les conducteurs entre une conduite réelle et une conduite simulée. Ces états émotionnels peuvent être mesurés par l'activité électromyographique, l'activité électrodermale, ou par électrocardiogramme.

Enfin, la validité écologique, relative à un protocole expérimental plus qu'à un simulateur, signifie que la situation étudiée reproduit une situation naturelle, contrairement à une situation artificielle conçue spécifiquement pour la recherche (Hoc, 2001).

4.5.3 Influence de la restitution de mouvements

De nombreuses études se sont penchées sur l'intérêt de la restitution de mouvements pour la simulation de conduite automobile. Les expérimentations de Parrish et Martin (1976), de Reid et Nahon (1988) ainsi que de Feenstra et al. (2009) ont montré une préférence subjective des conducteurs pour la simulation en présence de restitution inertielle.

McLane et Wierwille (1975) ont montré que l'absence de restitution de mouvements provoquait une dégradation de la performance de guidage des conducteurs (déviation latérale et de lacet). Les auteurs ont également observé un plus grand nombre de corrections au volant en simulation dynamique, suggérant une meilleure perception des déviations. Repa et al. (1982) ont également observé, lors d'une tâche de suivi de trajectoire en présence de vents latéraux, une diminution de 30% de l'écart latéral maximal et une diminution de 15% de l'angle volant maximal en présence de restitution de mouvements. Wierwille et al. (1983) ont observé une diminution du temps de réaction à un coup de vent latéral en simulation dynamique.

Reymond et al. (2001) ont montré l'importance de la restitution inertielle pour la régulation de la vitesse lors de la prise de virage, celle-ci aidant les conducteurs à maintenir l'accélération latérale du véhicule en-dessous d'un seuil. Correia Grácio et al. (2011) ont obtenu un résultat similaire pour une conduite en slalom. Les auteurs ont également observé que l'angle au volant sur simulateur statique était plus bruité, c'est-à-dire que les conducteurs effectuaient plus de corrections à haute fréquence. Les auteurs suggèrent que l'absence de restitution inertielle entrave la perception du risque.

Siegler et al. (2001) se sont intéressés à la tâche de freinage sur simulateur. Les auteurs ont observé une décélération maximale plus faible sur simulateur dynamique que sur simulateur statique, se rapprochant ainsi plus du comportement de freinage observé sur véhicule réel par Boer et al. (2000) (voir 4.5.1).

4.5.4 Le mal du simulateur

La cinétose est une réaction physiologique entraînant des symptômes tels que le mal de tête ou la nausée, en réaction à un mouvement. Elle peut prendre de nombreuses formes suivant le moyen de transport utilisé : mal de mer, de l'air ou de voiture. Les simulateurs de conduite n'échappent pas à ce phénomène, et certains sujets peuvent parfois ressentir le mal du simulateur.

La théorie la plus largement répandue pour expliquer le mal du simulateur et les cinétoses d'une manière générale est la théorie du conflit sensoriel (Reason et Brand, 1975). Selon les auteurs, la cinétose peut être expliquée par un conflit entre les informations de mouvement reçues par voie visuelle, vestibulaire et proprioceptive, non seulement entre elles, mais aussi et surtout par rapport à un mouvement attendu, en fonction de l'expérience passée. Ces conflits peuvent être intermodaux (par exemple entre les systèmes visuel et vestibulaire) aussi bien qu'intra-modaux (par exemple entre les canaux semi-circulaires et les organes à otolithes du système vestibulaire) (Pinto, 2007).

Pinto et al. (2008) insistent donc sur l'importance de la stimulation multisensorielle, et en particulier la restitution de mouvements, pour limiter les effets de cinétose lors de la simulation de conduite.

Afin de mesurer le mal du simulateur, Kennedy et al. (1993) ont développé un questionnaire,

le *Simulator Sickness Questionnaire*, permettant d'évaluer la sévérité du mal du simulateur ressenti par les conducteurs. Pour cela, l'intensité de plusieurs symptômes sont notés, selon trois dimensions : nausée, problèmes oculomoteurs et désorientation.

En utilisant ce questionnaire, de nombreuses études ont montré que le phénomène de mal du simulateur était largement réduit en présence de restitution de mouvements (Watson, 2000; Curry et al., 2002; Correia Grácio et al., 2011). Un autre facteur déterminant pour la simulation de conduite est la durée de simulation. En effet, de nombreuses études ont montré que plus la session de simulation est longue, plus la possibilité de ressentir des symptômes de cinétose est élevée (voir par exemple McCauley et Sharkey (1992); Cobb et al. (1999); Lo et So (2001)). Certaines manœuvres peuvent également augmenter le risque de mal du simulateur si elles sont trop nombreuses, comme le freinage ou les virages serrés (Roe et al., 2007). Ces paramètres doivent donc être pris en compte lors de l'élaboration de protocoles expérimentaux.

Deuxième partie

Partie expérimentale 1 : Assistance au contrôle longitudinal

Chapitre 5

Familiarisation avec un système Forward Collision Warning

Publié dans :
- Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2010). Familiarization with critical situations when using a forward collision warning : effects on driver-system interactions. *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, pp. 37-47.
- Koustanaï, A., Mas, A., Cavallo, V., et Delhomme, P. (2010). Familiarization with a forward collision warning on driving simulator : cost and benefice on driver-system interactions and trust. *Proceedings of Driving Simulation Conference*, pp. 169-179.
- Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2012, sous presse). Simulator training with a Forward Collision Warning system : effects on driver/system interactions and driver trust. *Human Factors*.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet européen MATISS, en partenariat avec Arnaud Koustanaï, Viola Cavallo et Patricia Delhomme de l'IFSTTAR (anciennement INRETS). Ces travaux ayant déjà été commencés lors de mon arrivée au Centre Technique de Simulation, ma participation à ce projet n'a été que partielle. Néanmoins, ce chapitre en présente succinctement les résultats principaux, compte tenu de leur pertinence par rapport à mon sujet de thèse.

5.1 Introduction

L'introduction de systèmes d'aide à la conduite dans les véhicules est un défi majeur pour la sécurité routière. Les systèmes d'alerte, en particulier, pourraient aider à éviter ou à limiter les conséquences de nombreux accidents de la route. Cependant, l'automatisation entraîne des changements dans le comportement des conducteurs, qui peuvent mener à des réactions non adaptées,

que ce soit en raison de la distraction, de la complaisance, ou de la surcharge attentionnelle des conducteurs (Bainbridge, 1983; Kantowitz, 2000; Parasuraman et Riley, 1997). Le développement des systèmes d'aide à la conduite nécessite donc des méthodes efficaces pour étudier la coopération conducteur/système, afin de garantir que leurs interactions ne soient pas néfastes pour la sécurité.

Le Forward Collision Warning (FCW) est un système d'alerte destiné à prévenir le conducteur lors d'une diminution critique de la distance de sécurité au véhicule le précédant. Ce système d'aide illustre bien les problèmes de coopération précédemment cités. En effet, le FCW peut par exemple générer des alertes inutiles, qui peuvent même être nuisibles, lorsque la situation ne présente pas de réel danger pour les conducteurs (Zador et al., 2000). C'est par exemple le cas lorsque le véhicule de devant ralentit pour tourner, ou lorsque le conducteur se prépare à dépasser un véhicule plus lent (LeBlanc et al., 2008). A l'inverse, certaines alertes sont volontairement ignorées par le système afin de diminuer le nombre de fausses alertes. Par exemple, le FCW testé par General Motors Corporation (2005) ignorait la détection d'objets immobiles, qui correspondent la plupart du temps à des objets sur le bord de la route, et était également désactivé en-dessous de $50km/h$, afin d'éliminer de nombreuses situations non dangereuses (zones urbaines, congestion, etc). Le système n'émettait pas non plus d'alerte pour les véhicules roulant dans une direction différente de celle du véhicule équipé, pour ne pas tenir compte des véhicules venant en sens inverse. Cependant, il est possible que la suppression d'alertes augmente le temps de réaction des conducteurs et diminue l'efficacité perçue du système (Parasuraman, 2000).

Lorsqu'ils utilisent un système tel que le FCW, les conducteurs doivent ajuster leur réponse à la situation, plutôt que de réagir automatiquement. Par conséquent, ils peuvent éprouver des difficultés à faire confiance au système, c'est-à-dire à déterminer si le système va les aider à identifier les évènements inattendus, dans des situations caractérisées par l'incertitude et la vulnérabilité (Bliss et Acton, 2003). Ces problèmes de confiance peuvent mener à des interactions conducteur/système moins efficaces. Des études sur route à grande échelle (*Field Operational Tests*), où la précision des instructions est primordiale, ont suggéré que la description détaillée des fonctionnalités du système ainsi que l'entraînement en situation normale ne sont pas suffisants pour que les conducteurs fassent confiance au système (voir par exemple General Motors Corporation (2005); Portouli et Papakostopoulos (2006); Regan et al. (2006); LeBlanc et al. (2008)). Selon General Motors Corporation (2005), les conducteurs explorent le fonctionnement du FCW en conditions extrêmes afin de mieux comprendre ses possibilités et ses limites. De même, d'après Cahour et Forzy (2009), la mise en situation avec un régulateur de vitesse améliore l'exploration et la confiance dans le système. Les auteurs ont remarqué que les conducteurs avaient une meilleure compréhension du fonctionnement du système après avoir regardé une vidéo présentant des situations critiques, plutôt qu'après simple lecture des instructions. Par conséquent, les simulateurs de conduite pourraient être des outils adaptés pour mettre les conducteurs dans de telles situations, tout en garantissant leur sécurité.

Cette étude a pour but d'évaluer l'influence de la familiarisation avec quelques cas d'usage du FCW sur le comportement des conducteurs et leur confiance dans le système. L'hypothèse était que la connaissance du fonctionnement du système dans des situations critiques améliorerait la

performance des conducteurs utilisant un FCW, par rapport à ceux conduisant sans assistance. De plus, il était attendu que la performance et la confiance des conducteurs augmente dans le cas où cette connaissance serait acquise par la pratique, plutôt que par la lecture d'instructions.

5.2 Méthode

5.2.1 Matériel

Cette expérimentation a été menée sur le simulateur CARDS2 du Centre Technique de Simulation Renault. Le simulateur est constitué d'une cabine équipée d'un tableau de bord entièrement fonctionnel, avec une boîte de vitesse manuelle à cinq rapports, et un volant à restitution d'effort. L'image est projetée sur trois écrans, offrant un angle de vision de 150° horizontalement et 40° verticalement. Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran central. Le simulateur est monté sur une plateforme à 6 degrés de liberté, permettant un déplacement de ± 20 cm et une rotation de ± 20°. Pour une description plus complète du simulateur, voir Reymond et Kemeny (2000). La figure 5.1 présente le dispositif expérimental.

La restitution des mouvements était désactivée pour cette expérimentation. La perception du *time-to-collision* impliquant principalement la composante visuelle (McLeod et Ross, 1983), la restitution de mouvements n'était donc pas considérée comme un élément crucial pour cette expérimentation.

En conduisant, les sujets devaient réaliser une tâche secondaire, connue comme la "surrogate reference task" (Mattes et Hallén, 2009; Petzoldt et al., 2011). Le but de cette tâche était de localiser une cible circulaire (150 mm de diamètre et 4 mm d'épaisseur) parmi 35 distracteurs (125 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur), affichés sur un écran déporté. Les sujets devaient alors sélectionner la zone où se trouvait la cible, en déplaçant un curseur vertical à l'aide d'un petit clavier. La tâche se terminait lorsqu'ils appuyaient sur une touche de validation, qui éteignait alors l'écran. Chaque nouvelle tâche était déclenchée manuellement par l'expérimentateur. La consigne donnée aux sujets était de réaliser la tâche le plus rapidement possible lorsqu'elle apparaissait, mais en donnant toujours la priorité à la sécurité de la conduite.

5.2.2 Forward Collision Warning

Le système Forward Collision Warning (FCW) utilisé dans cette expérimentation émettait une alerte visuelle et sonore lorsque la distance intervéhiculaire (*i.e.* la distance entre le véhicule du conducteur et le véhicule qui le précède) était inférieure à une distance D_{alerte}. Cette distance était déterminée par le *Stop-Distance-Algorithm* (Wilson et al., 1997), présenté dans l'équation 5.1 :



FIGURE 5.1 – Dispositif expérimental

$$D_{alerte} = V_2 \cdot \tau + \frac{V_2^2}{2 \cdot D_2} - \frac{V_1^2}{2 \cdot D_1} \tag{5.1}$$

Où $V_1(m/s)$ est la vitesse du véhicule de devant, $V_2(m/s)$ est la vitesse du véhicule du conducteur, $D_1(m/s^2)$ est la décélération supposée du véhicule de devant, $D_2(m/s^2)$ est la décélération supposée du véhicule du conducteur, et $\tau(s)$ est le temps de réaction supposé du conducteur. La valeur de τ a été fixée à 1.25 s, et celle de D_1 et D_2 à 5 m/s^2 (comme par exemple dans Abe et Richardson (2006)).

L'interface visuelle du FCW était affichée sur un écran situé au-dessus du tableau de bord (barre horizontale verte sur la figure 5.1). Trois états étaient possibles :

1. En-dessous de 50 km/h, le système était inactif, et la barre était jaune.
2. Au-dessus de 50 km/h, si la distance intervéhiculaire était supérieure à la distance d'alerte, la barre était verte.
3. Au-dessus de 50 km/h, si la distance intervéhiculaire était inférieure à la distance d'alerte, la barre était rouge.

Une alerte sonore était également émise lorsque la barre passait de vert à rouge.

5.2.3 Participants

28 personnes ont participé à cette expérimentation (20 hommes et 8 femmes). Toutes étaient employées chez Renault, avaient plus de 5 ans d'expérience de conduite, et conduisaient plus de 10 000 km par an. Aucun sujet n'avait eu d'expérience préalable avec un FCW. Tous avaient une vision normale ou corrigée à la normale.

Les sujets ont été répartis en 3 groupes : un groupe contrôle (10 sujets), un groupe non familiarisé (11 sujets) et un groupe familiarisé (7 sujets).

5.2.4 Protocole

L'expérimentation était séparée en deux conduites : la conduite de familiarisation et la conduite de test.

Avant la conduite de familiarisation, les sujets des groupes non familiarisé et familiarisé ont lu une brochure présentant le fonctionnement du FCW. Elle précisait les différents états du système (inactif en-dessous de 50 km/h et actif au-dessus), et présentait quelques cas d'usage critique (non détection des véhicules à l'arrêt, des véhicules ayant une différence de vitesse supérieure à 70 km/h avec le véhicule du conducteur, ou des véhicules se déplaçant dans des directions différentes).

Pendant la conduite de familiarisation, les sujets ont conduit sur une route de campagne à 2 voies de circulation, pendant 20 à 25 min. Seuls les sujets du groupe familiarisé ont utilisé le FCW, les sujets des groupes contrôle et non familiarisé ont conduit sans assistance.

Au cours de cette conduite, les sujets ont rencontré différents scénarios, correspondant à différentes situations critiques : absence d'alerte (véhicule à l'arrêt, véhicule à l'arrêt démarrant à l'arrivée du conducteur, véhicule venant en sens inverse dans un virage), déclenchement d'une alerte "utile" (décélération légère du véhicule de devant de l'ordre de 2 m/s^2, freinage d'urgence du véhicule de devant de l'ordre de 5 m/s^2). La conduite s'arrêtait lors du dépassement d'un véhicule plus lent, qui déclenchait une alerte "inutile".

Pendant la conduite de test, les sujets ont de nouveau conduit sur une route de campagne à 2 voies de circulation, pendant environ 65 min. Les sujets des groupes familiarisé et non familiarisé ont conduit avec le FCW, ceux du groupe contrôle ont continué sans assistance.

Six types de scénarios ont été présentés aux sujets lors de cette conduite :
- Deux scénarios où un véhicule traversait une intersection à 3 secondes devant le sujet. Ces scénarios ne déclenchaient pas d'alerte.
- Deux scénarios où le sujet devait dépasser un véhicule roulant à 70 km/h. Ces scénarios déclenchaient une alerte.
- Deux scénarios où le véhicule de devant freinait (avec une accélération de -3 m/s^2). Ces scénarios déclenchaient une alerte.
- Deux scénarios où le véhicule de devant tournait à une intersection, appliquant également une accélération de -3 m/s^2, mais activant son clignotant 5 secondes avant. Ces scénarios déclenchaient une alerte.
- Un scénario, à la fin de la conduite, où le véhicule de devant effectuait un freinage d'urgence, avec une accélération de -5 m/s^2. Ce scénario déclenchait une alerte.

Après la conduite de test, les sujets ont répondu aux mêmes questionnaires qu'après la conduite de familiarisation.

Pendant les deux conduites, la tâche secondaire était déclenchée manuellement par l'expérimentateur 1.5 s avant chaque scénario. Pour éviter que les sujets n'associent cette tâche avec l'apparition de dangers sur la route, la tâche secondaire était également déclenchée aléatoirement à plusieurs reprises en dehors de ces scénarios.

A la fin de chaque conduite, les sujets ont répondu à un questionnaire leur demandant d'évaluer la confiance qu'ils avaient en leurs propres performances de conduite, leur capacité à contrôler le simulateur, ainsi que la difficulté perçue de chacun des scénarios. Ces scores étaient mesurés sur une échelle à 7 niveaux.

5.3 Analyse de données

Pour chaque scénario, les indicateurs objectifs suivants étaient mesurés :

- Temps intervéhiculaire (TIV, voir 2.3.1, équation 2.3) moyen, mesuré pendant le scénario et 5 secondes avant.
- Vitesse $V(m/s)$.
- Temps de réaction (s), mesuré entre le déclenchement du scénario et la réponse du conducteur (relâchement de l'accélérateur et/ou freinage).
- Pourcentage de sujets ayant réagi, c'est-à-dire ayant relâché la pédale d'accélérateur et/ou ayant freiné.
- Décélération maximale (m/s^2) pendant le scénario.

Pour le groupe contrôle, l'algorithme de déclenchement du FCW a également été utilisé sur chacun des scénarios pour savoir si les sujets se trouvaient dans une situation qui déclencherait une alerte si le FCW était présent. Cela a permis de comparer, entre les groupes, la proportion de sujets conduisant trop près du véhicule de devant, selon le critère présenté précédemment.

5.4 Résultats

5.4.1 Tous scénarios confondus

Les résultats ont montré que les sujets des groupes contrôle (20.6 %) et non familiarisé (23.56 %) ont déclenché plus d'alertes (ou d'alertes potentielles dans le cas du groupe contrôle) que les sujets du groupe familiarisé (4.22 %), respectivement $\chi^2(1) = 4.82; p < 0.03$ et $\chi^2(1) = 6.66; p < 0.02$.

Nous avons observé un effet significatif du groupe sur le TIV avant les scénarios ($F(2, 25) = 3.6; p < 0.04$) ainsi que pendant ($F(2, 25) = 5.38; p < 0.01$), le temps de réaction ($F(2, 25) = 42.28; p < 0.001$) et la décélération maximale ($F(2, 25) = 4.49; p < 0.02$). La figure 5.2 résume ces résultats. Les tests post-hoc ont montré que les sujets du groupe familiarisé adoptaient un TIV plus grand que les deux autres groupes avant et pendant les scénarios, et que les sujets utilisant le FCW (familiarisés et non familiarisés) réagissaient plus rapidement et décéléraient moins que les sujets du groupe contrôle.

5.4.2 Par scénario

Lors des scénarios de freinage, nous avons observé un effet significatif du groupe sur le TIV moyen avant les scénarios ($F(2, 25) = 3.05; p < 0.03$) et sur le temps de réponse ($F(2, 25) = 28.37; p < 0.001$). La figure 5.3 illustre ces résultats. Les comparaisons post-hoc montrent que les sujets avec FCW ont adopté un TIV plus grand avant les scénarios et ont réagi plus rapidement

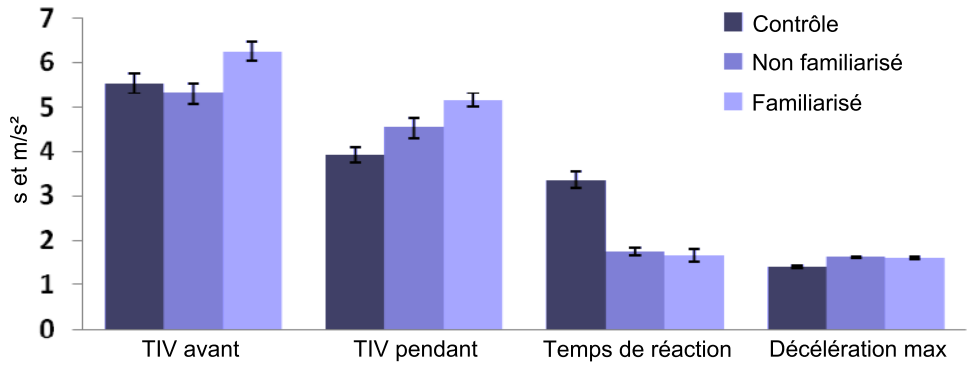


FIGURE 5.2 – Tous scénarios confondus : TIV moyen avant et pendant les scénarios, temps de réponse et décélération maximale. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

que les sujets du groupe contrôle.

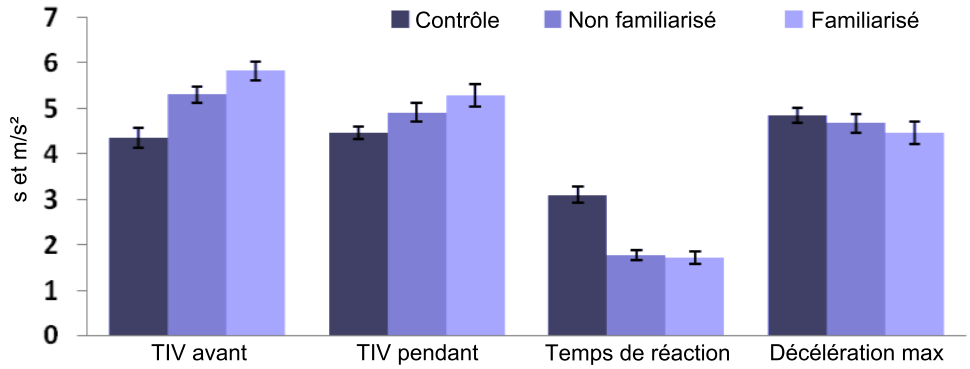


FIGURE 5.3 – Scénarios de freinage : TIV moyen avant et pendant les scénarios, temps de réponse et décélération maximale. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Lors du freinage d'urgence, une différence significative entre les groupes a été observée sur le TIV moyen avant les scénarios ($F(2,25) = 3.94; p < 0.03$) et pendant les scénarios ($F(2,22) = 4.99; p < 0.01$), ainsi que sur le temps de réaction ($F(2,22) = 3.67; p < 0.04$) et la décélération maximale ($F(2,22) = 3.67; p < 0.04$). La figure 5.4 résume ces résultats. Les analyses post-hoc ont montré que les sujets avec FCW ont réagi plus rapidement que les sujets du groupe contrôle. Les sujets du groupe familiarisé ont adopté un TIV plus grand avant et pendant le scénario que les autres sujets, et ont décéléré moins fort que les sujets du groupe contrôle. De plus, lors de ce freinage d'urgence, aucun des sujets du groupe familiarisé n'est entré en collision avec le véhicule de devant, contre deux sujets du groupe non familiarisé et quatre sujets du groupe contrôle.

Lors des scénarios de dépassement, les résultats ont montré un effet significatif du groupe sur le TIV minimum ($F(2,25) = 5.51; p < 0.01$). Selon les tests post-hoc, le TIV minimum était plus faible chez le groupe contrôle que les deux autres groupes.

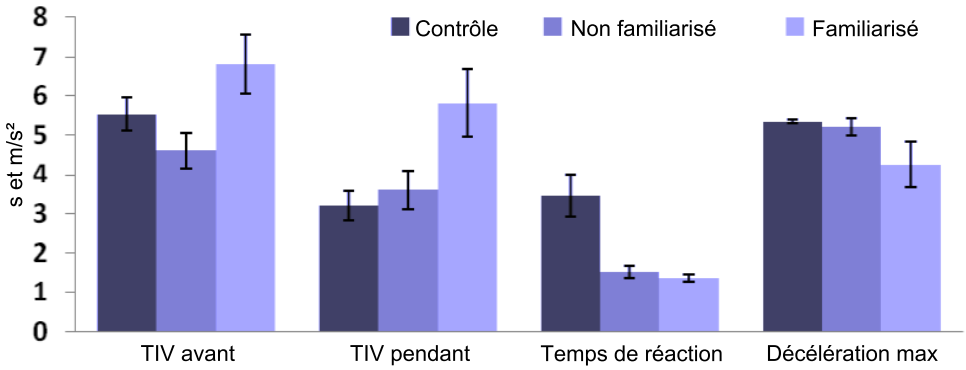


FIGURE 5.4 – Scénario de freinage d'urgence : TIV moyen avant et pendant le scénario, temps de réponse et décélération maximale. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Lors des scénarios où un véhicule traversait l'intersection, 50 % des sujets du groupe familiarisé et 53.84 % des sujets du groupe non familiarisé avaient déjà relâché l'accélérateur lorsque le le véhicule est rentré dans l'intersection, alors que 90 % des sujets du groupe contrôle étaient encore en train d'accélérer (respectivement $\chi^2(1) = 4.41; p = 0.035$ et $\chi^2(1) = 4.79; p = 0.03$).

Lors des scénarios où le véhicule de devant tournait à une intersection, les alertes ce sont avérées utiles : 83 % des sujets conduisant avec FCW ont relâché la pédale d'accélérateur après l'alerte. De plus, le groupe a eu un effet significatif sur le temps de réaction ($F(2, 24) = 11; p < 0.001$) : les sujets avec FCW ont réagi plus rapidement que les sujets du groupe contrôle.

5.4.3 Données subjectives

Après la conduite de familiarisation, les sujets du groupe familiarisé ont reporté avoir une meilleure confiance en leurs performances que les sujets du groupe contrôle ($t(14) = 3.39; p < 0.004$). Ils ont aussi évalué leur capacité à conduire le simulateur plus faiblement, par rapport aux sujets du groupe contrôle ($t(14) = 3.24; p < 0.005$).

Après la conduite de test, les sujets du groupe familiarisé ont également jugé leur performance de conduite plus faible par rapport aux sujets du groupe contrôle ($t(14) = 2.24; p < 0.04$). En revanche, les sujets des groupe familiarisé et non familiarisé ont jugé plus facile d'éviter le véhicule effectuant un freinage d'urgence, par rapport aux sujets du groupe contrôle (respectivement $t(14) = 2.55; p < 0.02$ et $t(20) = 2.91; p < 0.008$).

5.5 Discussion

5.5.1 Tous scénarios confondus

Les résultats ont confirmé l'efficacité du FCW, les sujets conduisant avec ce système montrant des temps de réaction plus courts, qu'ils soient familiarisés ou non. Ils ont également appliqué une décélération plus faible que les sujets du groupe contrôle, témoin d'une réaction plus souple et d'une meilleure anticipation.

Les sujets familiarisés avec le FCW ont déclenché moins d'alerte et ont adopté un TIV plus grand, avant et pendant les scénarios, que les sujets des autres groupes. La familiarisation a donc eu pour effet bénéfique d'inciter les conducteurs à adopter des distances de sécurité plus importantes.

5.5.2 Par scénario

Les scénarios de freinage montrent particulièrement l'efficacité du FCW : qu'ils soient familiarisés ou non, les sujets l'utilisant ont montré une meilleure anticipation à travers un TIV plus grand avant les scénarios et un temps de réaction plus court.

Le scénario de freinage d'urgence a également montré l'efficacité du FCW sur le temps de réaction des sujets. La familiarisation a aussi montré des conséquences positives sur le TIV et la décélération maximale.

Lors des scénarios de dépassement, les sujets conduisant avec le FCW ont adopté un TIV minimum plus grand que les sujets du groupe contrôle. Ce résultat indique que ces sujets ont commencé le dépassement plus tôt pour éviter le déclenchement d'une alerte. Ce comportement peut avoir un impact négatif sur la sécurité, les conducteurs ayant alors moins de temps pour observer le trafic environnant (Wilson et Best, 1982). Dans cette situation, la familiarisation avec le FCW n'a pas suffi à empêcher ce type de comportement.

Les scénarios où un véhicule traversait une intersection devant les sujets ont montré une proportion de réaction plus importante chez les sujets conduisant avec le FCW, bien qu'aucune alerte n'était déclenchée. Nous pensons que les sujets étaient particulièrement attentifs à cette situation, car elle était détaillée dans le manuel descriptif du FCW qui leur était présenté, comme une situation où le système ne déclencherait pas d'alerte.

Lors des scénarios où le véhicule de devant tournait à une intersection, malgré l'activation de son clignotant, l'alerte du FCW s'est avérée utile. Ce résultat montre que les sujets n'ont pas réussi à percevoir le clignotant, vraisemblablement à cause de la distraction due à la tâche secondaire.

5.5.3 Données subjectives

Les questionnaires ont montré que la familiarisation avec le FCW réduisait la confiance des sujets en leurs propres performances de conduite. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Ivancic et Hesketh (2000) qui ont montré que l'entraînement par essais et erreurs, s'il améliorait les capacités de conduite, diminuait la confiance en soi des conducteurs.

5.6 Conclusion

Cette étude a montré que le simulateur de conduite s'est montré pertinent pour évaluer l'influence du FCW sur la sécurité de conduite. En effet, la présence du système a permis aux conducteurs de réagir plus rapidement dans des scénarios où ils étaient distraits.

La session de familiarisation au système d'aide a également montré des bénéfices par rapport à la simple lecture d'un manuel, à travers l'adoption d'un TIV plus élevé pour le suivi de véhicule, et des réactions plus souples lors de situations critiques. Ces résultats montrent donc que le simulateur de conduite est un outil adapté pour observer les effets d'une telle familiarisation.

Ces résultats suggèrent que les simulateurs de conduite pourraient s'avérer très utiles pour des études à grande échelle sur les système d'aide à la conduite. Les conducteurs pourraient ainsi être soumis dans un premier temps à un échantillon de situations critiques afin de se familiariser avec un système, en toute sécurité. Le transfert à court et à long terme des connaissances du simulateur à la conduite réelle resterait néanmoins une piste à étudier.

Des applications futures pourraient également viser à améliorer le processus de familiarisation. Par exemple, cette étude a soulevé un comportement néfaste des conducteurs avec FCW lors d'un dépassement, qui avaient tendance à se déporter trop tôt afin de sortir de la zone d'alerte. Une familiarisation orientée vers ce type de situations pourrait servir à corriger ce comportement. De même, la familiarisation avec le FCW a eu une influence négative sur la confiance des conducteurs en leurs propres performances. Une nouvelle étude pourrait s'intéresser à l'influence réelle de cette tendance subjective sur le comportement objectif.

Troisième partie

Partie expérimentale 2 : Assistance au contrôle latéral

Chapitre 6

Modélisation de systèmes d'aide au contrôle latéral

6.1 Introduction

Cette partie expérimentale a pour objectif d'étudier l'adaptation des conducteurs à des systèmes d'aide au contrôle latéral. Pour le besoin des expérimentations, réalisées sur simulateurs de conduite, des systèmes d'aide au contrôle latéral ont été implémentés spécialement. Le développement de ces systèmes ne consituant pas le cœur de cette étude, ils avaient avant tout une vocation de prototype, afin d'illustrer les mécanismes d'adaptation engendrés par ce type de systèmes.

Ces expérimentations cherchant à observer l'effet de niveaux d'automatisation différents sur l'adaptation comportementale des conducteurs, deux systèmes d'aide au contrôle latéral ont été développés, illustrant deux niveaux d'automatisation différents : le Lane Departure Warning et le Lane Keeping Assistant.

6.2 Principe général

Sur une voiture réelle, le retour d'effort au volant résulte de contraintes mécaniques (résistance de la colonne de direction, des pneumatiques, etc), qui sont ensuite compensées par le système de direction assistée pour améliorer le confort de conduite. En revanche, sur un simulateur de conduite, le volant n'a pas de retour d'effort en raison de l'absence de ces contraintes mécaniques. Un modèle numérique de direction est donc utilisé, afin de restituer sur le volant un retour d'effort réaliste (Mohellebi et al., 2009). Au cours de la conduite, ce modèle calcule en temps réel une valeur de couple qui est envoyée à un restituteur d'effort qui applique ce couple au volant.

Les deux systèmes d'aide au contrôle latéral présentés dans ce chapitre agissent sur le volant. Ils calculent également un couple à appliquer au volant, qui est ajouté au couple résultant du modèle de la direction. Pour calculer ce couple, les systèmes d'aide au contrôle latéral se basent sur l'écart latéral instantané du véhicule. Cette mesure correspond à la distance entre l'axe central du véhicule et le centre de la voie, et prend des valeurs positives (respectivement négatives) pour les écarts à gauche (respectivement à droite) du centre de la voie. Comme le modèle proposé par Mohellebi et al. (2009), le couple calculé est ensuite ajouté au couple résultant du modèle de direction. Le couple total est alors envoyé au restituteur d'effort.

6.3 Lane Departure Warning

6.3.1 Fonctionnement

Ce système d'aide au contrôle latéral est un système de type "alerte" : son but est de prévenir le conducteur d'une situation potentiellement dangereuse, et de la nécessité d'une action correctrice de sa part. Pour cela, lorsque l'écart latéral du véhicule dépasse un certain seuil, le Lane Departure Warning (LDW) produit un couple qui est envoyé au volant afin de le faire osciller. La figure 6.1 illustre ce principe.

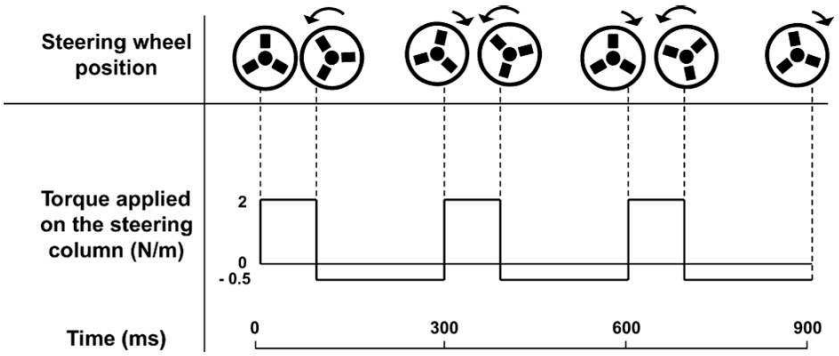


FIGURE 6.1 – Principe de l'amorçage moteur (d'après Navarro et al., 2010)

Lorsqu'il se déclenche, le LDW produit un couple volant sous forme d'un signal rectangulaire de période 300 ms. Ce signal est asymétrique, afin que le couple volant soit légèrement plus fort en direction du centre de la voie qu'en direction de la sortie de voie. Le couple généré par le LDW est de 2 N en direction du centre de la voie, et de 0.5 N en direction opposée.

En reprenant la typologie de Hoc et al. (2009), ce système d'aide correspond au mode de contrôle mutuel, et plus précisément au mode "amorçage moteur" (voir 3.2.1).

6.4 Lane Keeping Assistant

6.4.1 Fonctionnement

Le principe de ce système d'aide au contrôle latéral, plutôt qu'une alerte, est plus une coopération avec le conducteur. Ici, le système participe donc activement au contrôle du véhicule, sans pour autant se substituer totalement au conducteur humain. Pour cela, il applique un couple au volant proportionnel à l'écart latéral du véhicule. Cependant, comme ce système n'a pas vocation à remplacer le conducteur, le modèle ne calcule pas l'angle au volant optimal permettant de corriger la trajectoire. Au lieu de cela, le volant est piloté en couple uniquement, afin de compléter l'action du conducteur.

En reprenant la typologie de Hoc et al. (2009), ce système d'aide correspond également au mode de contrôle mutuel mais, contrairement au LDW, il utilise le mode "limite" plutôt que l'"amorçage moteur". Le mode "limite" consiste en effet à délivrer une résistance contre l'action du conducteur lorsque celui-ci s'éloigne des conditions de conduite sûre. Comme le soulignent les auteurs, ce mode de coopération devient plus intrusif dans le contrôle du véhicule que le mode précédent.

6.4.2 Modèle

Le modèle de Lane Keeping Assistant (LKA) calcule un couple à appliquer au volant en fonction de l'écart latéral du véhicule. Afin de fournir un couple volant continu et sans à-coups, ce modèle de LKA fonctionne selon trois états, chacun implémentant une loi différente. Ces trois états correspondent aux trois situations suivantes :

1. *Sortie de voie.* Cet état est sélectionné lorsque la valeur absolue de l'écart latéral croît.
2. *Retour vers le centre de la voie.* Cet état est sélectionné lorsque la valeur absolue de l'écart latéral décroît.
3. *Changement de voie.* Cet état est sélectionné lorsque la voie sur laquelle se trouve le véhicule est différente de celle où il se trouvait au pas de temps précédent.

Le tableau 6.1 définit les variables utilisées dans les lois de couple volant du modèle.

L'équation 6.1 présente la loi de couple volant lors de la sortie de voie.

$$\Gamma(\epsilon) = \left(\Gamma_{max} - |\hat{\Gamma}|\right) \cdot \left(\frac{\epsilon - \hat{\epsilon}}{|\epsilon_{max} - \hat{\epsilon}|}\right)^n + \hat{\Gamma} \tag{6.1}$$

La définition du couple relativement aux valeurs d'écart latéral et de couple à l'état précédent, respectivement $\hat{\epsilon}$ et $\hat{\Gamma}$, permet de s'assurer de la continuité du couple appliqué au volant lors du changement d'état.

TABLEAU 6.1 – Définition des variables utilisées par le modèle

Γ	Couple volant
ϵ	Ecart latéral du véhicule
Γ_{max}	Couple maximum
ϵ_{max}	Ecart latéral maximum
$\hat{\Gamma}$	Dernier couple à l'état précédent
$\hat{\epsilon}$	Dernier écart latéral à l'état précédent
n	Ordre de la loi "sortie de voie"
m	Ordre de la loi "retour vers le centre de la voie"

L'équation 6.2 présente la loi de couple volant lors du retour vers le centre de la voie.

$$\Gamma(\epsilon) = |\hat{\Gamma}| \cdot \left(\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}}\right)^m \cdot \frac{\epsilon}{|\epsilon|} \tag{6.2}$$

Le paramètre m, définissant l'ordre de la loi, permet de modifier l'amortissement du couple volant lors du retour vers le centre de la voie. En effet, en choisissant un paramètrage tel que $m > n$, le couple diminuera plus rapidement qu'il n'augmente lors de la sortie de voie. Cela est en effet souhaitable pour éviter des retours vers le centre de la voie trop brutaux, qui entraîneraient immédiatement une sortie de voie dans la direction opposée.

L'équation 6.3 présente la loi de couple volant lors du changement de voie.

$$\Gamma(\epsilon) = |\hat{\Gamma}| \cdot \left(\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}}\right)^m \cdot \frac{\hat{\Gamma}}{|\hat{\Gamma}|} \tag{6.3}$$

Le tableau 6.2 présente les valeurs appliquées aux paramètres du modèle. L'écart latéral maximum correspond à l'écart latéral lorsque le véhicule est sur la ligne de démarcation de voie, pour une voie de 3.5 m de large. Le couple maximum associé reprend le couple maximum délivré par le LDW.

TABLEAU 6.2 – Valeurs appliquées aux paramètres du modèle

$n = 1$
$m = 6$
$\Gamma_{max} = 2\,\mathrm{N}$
$\epsilon_{max} = 1.75\,\mathrm{m}$

A titre d'exemple, la figure 6.2 présente un extrait d'enregistrement d'une conduite avec le LKA, représentant l'écart latéral du véhicule et le couple renvoyé par le modèle.

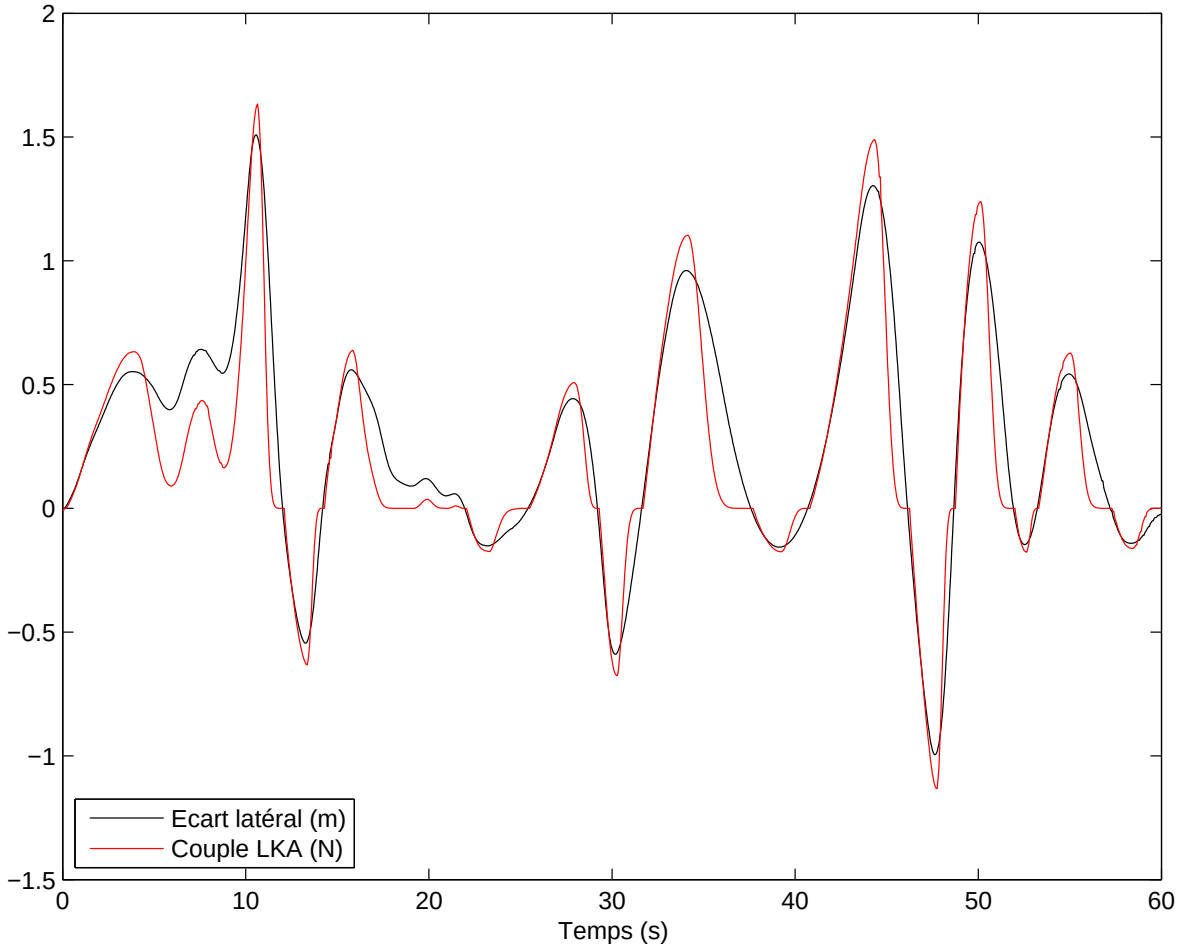


FIGURE 6.2 – Extrait d'enregistrement d'une conduite avec le LKA : la courbe noire représente l'écart latéral du véhicule et la courbe rouge représente le couple renvoyé par le modèle.

Chapitre 7

Assistance au contrôle latéral et situation d'urgence : expérience sur simulateur statique

Publié dans :
– Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, IN.
– Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in Transportation Studies* RSS2011 Special Issue, 149-158.

7.1 Introduction

Dans de nombreuses études, le concept de niveaux d'automatisation a été développé pour catégoriser le degré d'interaction entre l'Homme et la machine, allant du contrôle totalement manuel au contrôle totalement automatique (Sheridan et Verplanck, 1978; Endsley et Kaber, 1999; Parasuraman et al., 2000). Une autre classification a été proposée pour le contexte plus spécifique des systèmes d'aide à la conduite (Hoc et al., 2009), définissant quatre mode de coopération principaux : le mode de perception, le mode de contrôle mutuel, le mode de délégation de fonction, et le mode totalement automatique.

L'automatisation centrée sur l'humain a pour objectif de trouver le niveau d'automatisation le plus efficace pour une tâche donnée. En effet, des niveaux d'automatisation élevés n'impliquent pas nécessairement de meilleures performances, étant donné que l'opérateur humain peut avoir des difficultés à reprendre le contrôle lorsque nécessaire (Kaber et Endsley, 2004), principalement à cause de confiance excessive (Parasuraman et Riley, 1997).

Par conséquent, il est important d'étudier le comportement des conducteurs avec des systèmes d'aide à la conduite, dans des situations où ces systèmes ne fournissent pas d'aide (Saad, 2006). Ainsi, plusieurs études ont porté sur des situations de défaillance des systèmes d'aide à la conduite (Ben-Yaacov et al., 2002; Sullivan et al., 2008; Deborne et al., 2008), mais les situations d'urgence, pour lesquelles les systèmes d'aide à la conduite ne sont pas originellement conçus, ont suscité moins d'attention.

Quelques auteurs ont étudié le freinage d'urgence en présence de systèmes d'aide au contrôle longitudinal : Koustanaï et al. (2010) ont observé, sur un simulateur de conduite, moins de collisions avec le véhicule précédent parmi les conducteurs utilisant un système Forward Collision Warning que parmi les conducteurs n'utilisant pas d'assistance. En revanche, Nilsson (1995) a observé, sur un simulateur de conduite et dans une situation similaire, plus de collisions parmi les conducteurs utilisant un système Adaptive Cruise Control que parmi ceux n'uilisant pas d'assistance. En ce qui concerne les systèmes d'aide au contrôle latéral, Hoc et al. (2006) ont observé, lors d'un essai sur piste réelle, des difficultés pour les conducteurs à reprendre le contrôle afin d'éviter un obstacle, lorsqu'ils conduisaient avec un système d'aide au contrôle latéral utilisant le mode de délégation de fonction, mais pas de réel effet lorsqu'ils conduisaient avec un système d'aide au contrôle latéral utilisant le mode de contrôle mutuel. Néanmoins, les auteurs ont souligné que, malgré une apparente validité écologique, la méthode d'essai sur piste réelle comprenait trop de contraintes techniques et sécuritaires, et que des études sur simulateur de conduite étaient nécessaires.

Ainsi, l'objectif de cette expérimentation était d'étudier, sur un simulateur de conduite, la réaction de conducteurs utilisant un système d'aide au contrôle latéral lors d'une situation d'urgence nécessitant une reprise manuelle du contrôle latéral. Une situation d'urgence relevant du contrôle latéral mais non gérée par le système d'aide au contrôle latéral a donc été choisie : l'évitement d'obstacle. Etant donné qu'un effet du niveau d'automatisation semble émerger des études précédemment citées, deux systèmes d'aide au contrôle latéral différents ont été comparés, afin d'illustrer deux niveaux d'automatisation différents.

De plus, une autre facette de la question de cette expérimentation était de comprendre également l'origine des effets éventuels du système d'aide au contrôle latéral sur la réaction des conducteurs en situation d'urgence. En effet, ils peuvent être dus à deux facteurs : l'adaptation comportementale, résultant de l'expérience passée des conducteurs avec le système d'aide, ou le déclenchement du système d'aide au moment même de la situation d'urgence, qui pourrait avoir une action entrant en conflit avec la réaction des conducteurs cherchant à éviter l'obstacle.

7.2 Méthode

7.2.1 Matériel

Une expérimentation a été menée sur le simulateur d'éclairage du Centre Technique de Simulation de Renault (voir 4.3.1). Le simulateur (voir 4.3.1) est constitué d'un véhicule (Renault Scenic) équipé d'une boîte de vitesse automatique. La scène visuelle est projetée sur un écran cylindrique offrant un angle de vision de 210°.

Les deux systèmes d'aide au contrôle latéral décrits dans le chapitre précédent ont été utilisés. Afin de les distraire et de leur faire déclencher le système d'aide au contrôle latéral, les conducteurs devaient réaliser une tâche secondaire tout en conduisant. Cette tâche secondaire est appelée "surrogate reference task" (Mattes et Hallén, 2009; Petzoldt et al., 2011). Le but de cette tâche est de localiser une cible circulaire (190 mm de diamètre et 4 mm d'épaisseur) parmi 65 distracteurs (150 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur), affichés sur un écran déporté. Les participants devaient sélectionner la zone de la cible en déplaçant un curseur à l'aide d'un clavier embarqué. Une nouvelle tâche démarrait 15 secondes après le dernier mouvement du curseur. La consigne donnée aux participants était de réaliser la tâche le plus rapidement possible lorsqu'elle apparaissait, mais en donnant toujours la priorité à la sécurité de la conduite. La tâche secondaire était affichée sur un écran embarqué et les sujets interagissaient avec un petit clavier (de type pavé numérique), tous deux déportés sur la droite du tableau de bord, comme le montre la figure 7.1.

7.2.2 Participants

27 personnes ont participé à cette expérimentation (23 hommes et 4 femmes). Toutes étaient employées chez Renault. Les participants avaient un âge moyen de 36.2 ans ($\sigma = 10$), un permis de conduire valide depuis 17 ans en moyenne ($\sigma = 10.2; min = 3$), et n'étaient pas des pilotes experts. Leur kilométrage annuel moyen était de 18519 km ($\sigma = 13420$). Tous les sujets avaient une vision normale ou corrigée à la normale.

7.2.3 Protocole

Déroulement

Les sujets ont conduit selon un itinéraire d'environ 14 km, sur une route de campagne à deux voies. La figure 7.2 présente l'itinéraire suivi. La consigne qui leur était donnée était de conduire naturellement, en respectant le code de la route (la limite de vitesse était de 90 km/h, et 70 km/h ou 50 km/h dans les virages, selon le rayon de courbure). Du trafic était présent en sens inverse, afin d'inciter les conducteurs à rester sur leur voie.



FIGURE 7.1 – Dispositif expérimental, montrant la tâche secondaire sur la droite

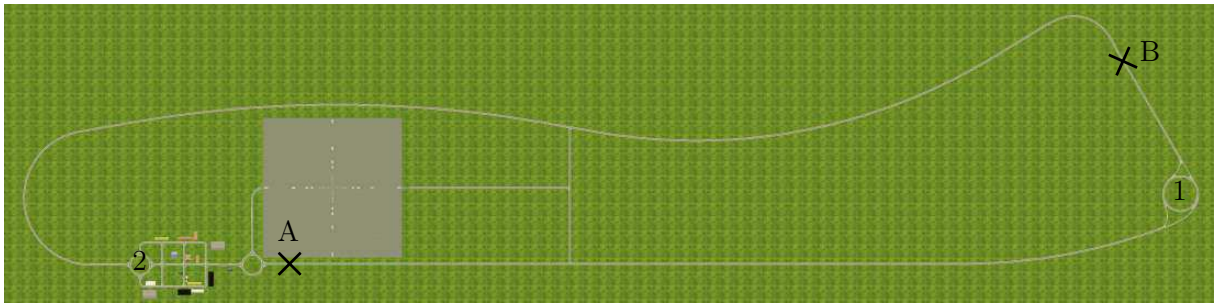


FIGURE 7.2 – Itinéraire suivi : les participants sont partis du point A, ont continué tout droit au rond-point n°1, ont fait demi-tour au rond-point n°2, et se sont arrêtés au point B.

L'expérimentation était divisée en deux conduites : une conduite de familiarisation et une conduite de test, suivant le même parcours. Chaque conduite durait environ 13 minutes. Pendant la conduite de familiarisation, les sujets ont conduit sans système d'aide au contrôle latéral, afin de s'habituer au simulateur et à la tâche secondaire. Ensuite, ils ont été répartis en trois groupes : le groupe contrôle, le groupe Lane Departure Warning (LDW) et le groupe Lane Keeping Assistant (LKA). Pendant la conduite de test, les sujets du groupe contrôle ont continué à conduire sans système d'aide, alors que les sujets des groupes LDW et LKA ont conduit avec leurs systèmes d'aide respectifs.

Situation d'urgence

A la fin de la conduite de test, les sujets ont rencontré une situation d'urgence : un camion était garé sur le bord de la route. La figure 7.3 illustre cette situation. Le camion était situé à la sortie d'un virage à droite, et derrière une rangée d'arbre, afin que les sujets ne le voient qu'au dernier moment. Il n'y avait pas de trafic en sens inverse au moment de la situation d'urgence, pour permettre aux sujets de doubler le camion. Cet évènement n'a eu lieu qu'une seule fois pour chaque sujet, afin de conserver l'effet de surprise.

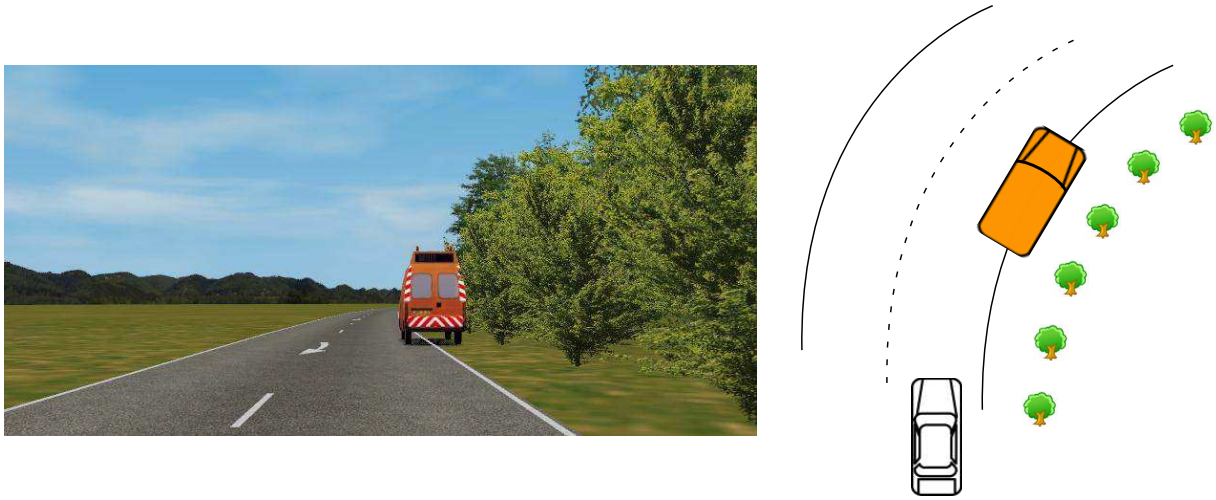


FIGURE 7.3 – Situation d'urgence

Questionnaire

Les sujets des groupes LDW et LKA ont également eu un questionnaire à remplir, portant sur leur évaluation subjective du système d'aide qu'ils utilisaient. Ce questionnaire, traduit en français à partir de l'original en anglais proposé par van der Laan et al. (1997), propose les 9 items présentés dans le tableau 7.1. Il mesure l'acceptation subjective d'un système d'aide à la conduite selon

deux dimensions : l'utilité et la satisfaction. Pour chacun des items, les sujets devaient situer sur une échelle l'opinion qu'ils avaient du système d'aide, entre deux adjectifs contraires.

Comme préconisé par les auteurs du questionnaire original, ce questionnaire a été présenté aux sujets avant et après la conduite de test. Avant, les sujets avaient pour consigne d'évaluer le système d'aide à la conduite tel qu'ils l'imaginaient, en se basant sur la description orale qu'ils en avaient eue. Après, ils avaient pour consigne d'évaluer le système d'aide qu'ils venaient d'utiliser en situation de conduite. Ces deux questionnaires seront mentionnés dans la suite de ce chapitre comme les questionnaires "avant" et "après".

TABLEAU 7.1 – Items du questionnaire présenté aux sujets.

utile						inutile
plaisant						déplaisant
mauvais						bon
agréable						agaçant
efficace						superflu
irritant						appréciable
d'une grande aide						sans intérêt
non souhaitable						souhaitable
stimulant						soporifique

7.3 Analyse de données

7.3.1 Conduite normale

Afin de mesurer l'apport des systèmes d'aide au contrôle latéral, le suivi de trajectoire a été évalué sur deux portions différentes de l'itinéraire : une courbe vers la droite (de longueur 1020 m et de rayon de courbure 244 m) et une ligne droite (de longueur 910 m). La trajectoire de référence que nous avons choisie est la ligne imaginaire suivant le centre de la voie de droite, afin de mesurer la capacité des sujets à rester dans cette voie (aucun changement de voie n'était nécessaire au cours de la conduite).

Dans cette optique, l'intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) du véhicule du sujet a été calculée, par rapport à cette trajectoire de référence (Mattes, 2003). L'ICEL est représenté sur la figure 7.4. Cette valeur correspond à l'aire entre le centre de la voie et la trajectoire du véhicule, au cours d'un itinéraire donné. Elle représente ainsi la quantité de déviation autour de l'axe central de la voie

Afin d'analyser l'apport des systèmes d'aide au contrôle latéral, nous avons réalisé, pour la ligne droite et la courbe :
– Une analyses de la variance (ANOVA) sur l'ICEL pendant la conduite de familiarisation, avec

le groupe comme variable indépendante, ou un test de Kruskal-Wallis dans le cas où les données ne suivaient pas une loi normale. Ce test a pour but de vérifier l'absence de biais initial entre les groupes.
– Pour chaque groupe, un test de Wilcoxon, comparant deux-à-deux les valeurs d'ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test.

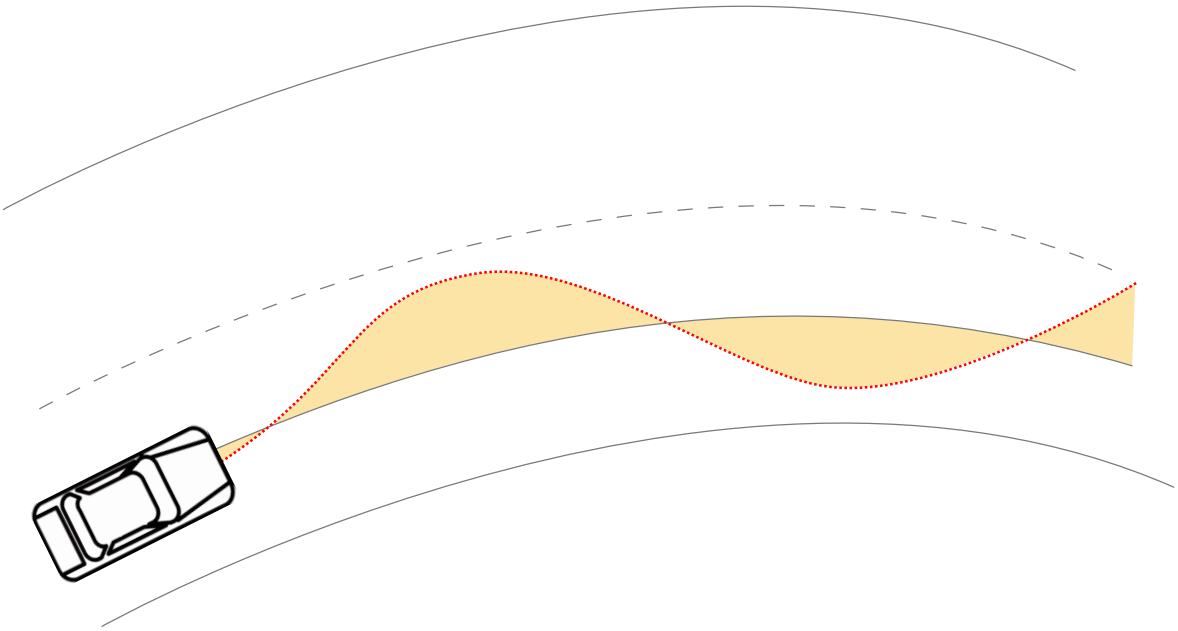


FIGURE 7.4 – Intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) : aire représentée en jaune.

Une deuxième analyse a été réalisée sur l'ICEL dans la courbe, afin de déterminer si les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral agissaient principalement sur les déviations vers la gauche ou vers la droite. Ainsi, l'ICEL a été séparé en deux grandeurs : l'ICEL gauche (ICEL pour les positions à gauche du centre de la voie) et l'ICEL droite (ICEL pour les positions à droite du centre de la voie). Des tests de Wilcoxon ont donc été réalisés, comme décrit précédemment, sur les ICEL gauche et droite.

7.3.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

Les indicateurs suivants ont été mesurés, afin de qualifier la sécurité globale de la manœuvre d'évitement :
– Le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, noté TTC_0.
– Le temps passé sur la voie de gauche pendant l'évitement, noté T_{gauche}.

– L'écart latéral maximum pendant l'évitement, noté $max(\epsilon)$, mesuré par rapport au centre de la voie de droite.
– La distance minimale à l'obstacle pendant l'évitement, notée $min(D_{obstacle})$.

Le TTC définit le temps avant la collision entre deux véhicules (voir 2.4, équation 2.6). On peut donc le définir, dans le cas présent où le véhicule de devant est à l'arrêt, par l'équation 7.1 :

$$TTC(t) = \frac{D(t)}{V(t)} \tag{7.1}$$

Où $D(t)$ est la distance inter-véhicules (distance longitudinale, suivant le tracé de la route, et non distance euclidienne), et $V(t)$ la vitesse du véhicule du sujet.

Dans le cas présent de l'évitement d'obstacle, le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement est utilisé pour quantifier le temps de réaction des sujets. En effet, plus la valeur de TTC_0 est petite, plus la réaction des sujets est tardive.

La distance à l'obstacle $D_{obstacle}(t)$ correspond à la distance euclidienne, à un instant t, entre le véhicule du sujet et le camion. Les véhicules dans SCANeR© étant représentés au sol par des rectangles, les distances entre chacun des quatre segments délimitant le véhicule du sujet et chacun des quatre segments délimitant le camion sont calculées, à l'aide de l'algorithme proposé par Lumelsky (1985). La distance $D_{obstacle}$ correspond donc à la valeur minimale de ces distances calculées.

L'indicateur $min(D_{obstacle})$ correspond ainsi à la marge de sécurité que laissent les sujets entre leur véhicule et le camion lors de l'évitement.

Accélération latérale

D'après Reymond et al. (2001), lors de la prise de virage les conducteurs ajustent leur vitesse de façon à maintenir l'accélération latérale du véhicule en-dessous d'un maximum accepté. Selon les auteurs, les conducteurs se fixent un tel seuil afin de garder une "marge de sécurité" au cas où un évènement imprévu les forcerait à dévier de leur trajectoire.

La situation d'urgence créée pour cette expérimentation représentant un tel évènement, il était donc attendu que son évitement génère une accélération latérale supérieure à ce seuil. Nous avons donc cherché à quantifier ce pic d'accélération latérale, et à observer si une régulation par la vitesse est également possible lors d'une telle situation d'urgence. La figure 7.5 représente un exemple d'enregistrement de l'accélération latérale en fonction de la vitesse, tout au long de la conduite de test (qui inclue donc la situation d'urgence).

Les profils observés sont très différents de ceux observés par Reymond et al. (2001). En effet, les auteurs observaient uniquement des prises de virage, pour des virages de courbures variées,

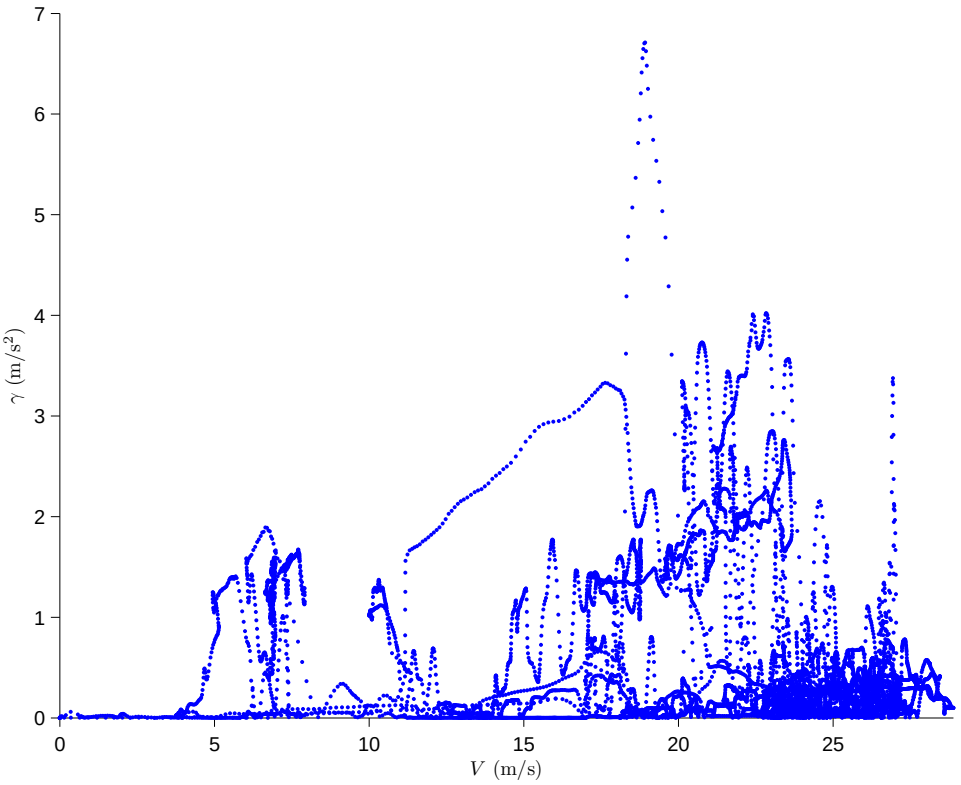


FIGURE 7.5 – Représentation de l'accélération latérale γ en fonction de la vitesse V pendant la conduite de test. Exemple pour un sujet.

alors qu'ici l'enregistrement comprend de la conduite en ligne droite aussi bien qu'en virage (et la prise de virage n'étant pas l'objet principal de cette expérimentation, les rayons de courbure varient ici dans une fourchette plus restreinte).

Il est cependant intéressant de noter, pour la plupart des sujets, un pic d'accélération latérale. Sur la figure 7.5, on peut par exemple observer un pic à presque $7m/s^2$ pour une vitesse légèrement inférieure à $20m/s$. Ce pic correspond vraisemblablement à l'évitement de l'obstacle à la fin de la conduite.

Nous avons donc, pour chaque sujet, extrait de l'enregistrement la portion de route où se déroulait la situation d'urgence, puis calculé sur cet intervalle l'accélération latérale maximale ainsi que la vitesse associée (i.e. la vitesse du véhicule au moment où il atteignait cette accélération maximale). Ces données ont également été calculées sur la même portion de route lors de la conduite de familiarisation (donc sans situation d'urgence) afin d'évaluer le gain en accélération latérale que représentait cet évitement d'obstacle. Afin d'évaluer d'une part l'influence de la situation d'urgence, et d'autre part celle du système d'aide sur ces deux valeurs, des ANOVAs à mesures répétées ont été réalisées.

Décomposition de la manœuvre d'évitement

La figure 7.6 représente un exemple typique de manœuvre d'évitement de l'obstacle. Dans cette manœuvre, nous pouvons distinguer trois phases successives :

1. Premièrement, les conducteurs ont réagi rapidement, en appliquant une correction au volant vers la gauche, afin d'éviter l'obstacle (entre les temps t_0 et t_1).
2. Deuxièmement, les conducteurs ont contrebraqué dans la direction opposée afin de revenir vers la voie de droite (entre les temps t_1 et t_2).
3. Troisièmement, les conducteurs ont ramené puis stabilisé le volant autour de la position centrale (à ce stade de la manœuvre, la route était en ligne droite), afin de continuer la conduite sur la voie de droite (entre les temps t_2 et t_3). Le critère choisi pour la stabilisation du volant était que l'angle reste entre -5° et +5° (relativement à la position centrale) pendant 3 secondes, à partir du temps t_3.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous référerons à ces trois étapes en tant que phase 1, phase 2 et phase 3.

Analyse par phase

Afin de mieux comprendre les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral, nous avons analysé la façon dont les conducteurs ont éviter l'obstacle, pour chaque groupe et pour chaque phase. Cette manœuvre implique deux boucles de contrôle différentes. En effet, comme suggéré par Reid (1983), les conducteurs réagissent d'abord rapidement à la situation initiale, en utilisant

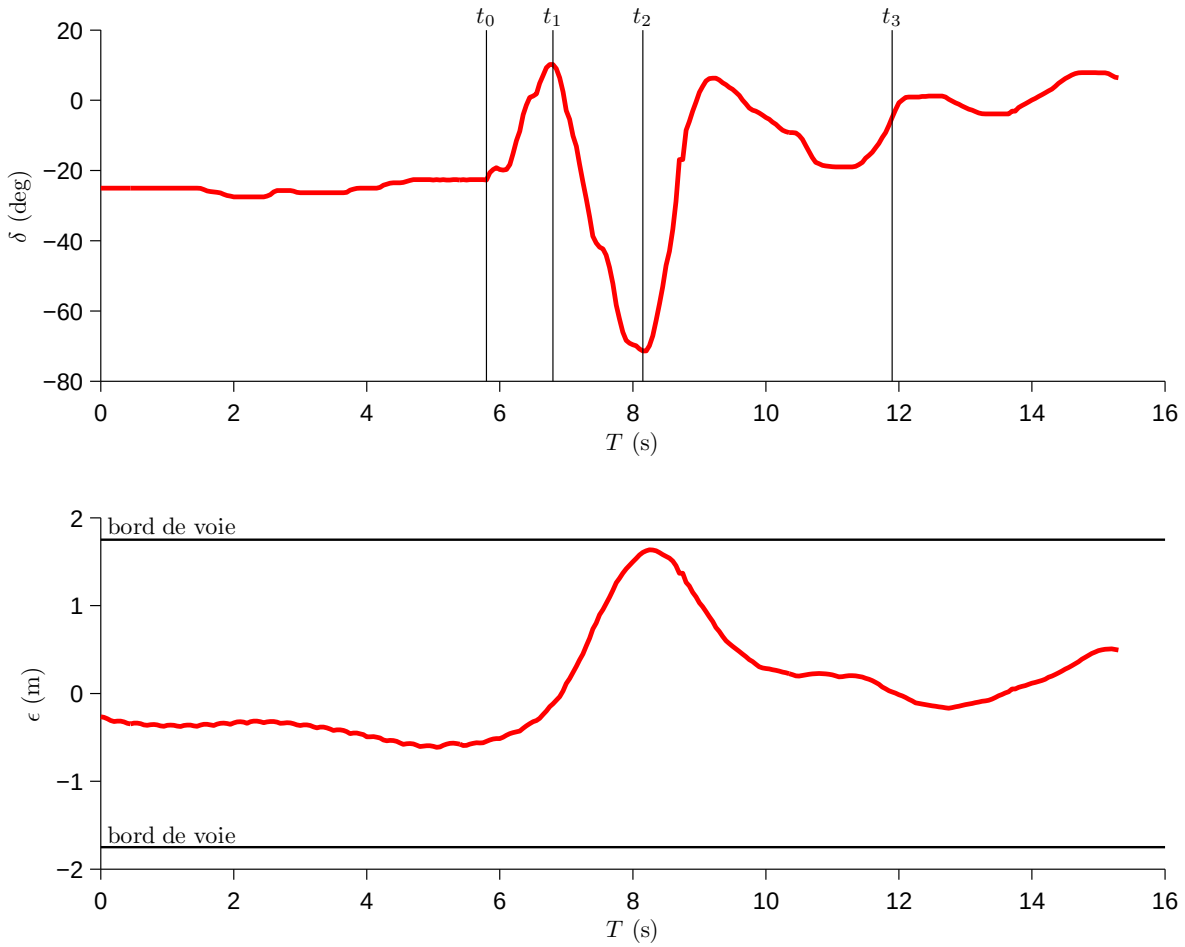


FIGURE 7.6 – Exemple d'une manœuvre d'évitement. Le graphique du dessus montre l'angle volant δ en fonction du temps. Le graphique du dessous montre l'écart latéral ϵ en fonction du temps. Les valeurs positives correspondent à un angle volant ou un écart latéral vers la gauche.

une stratégie de contrôle en boucle ouverte (phase 1). Puis, une fois suffisamment proches de la trajectoire souhaitée, ils basculent sur un contrôle latéral utilisant une stratégie de contrôle en boucle fermée (phases 2 et 3). Les systèmes d'aide au contrôle latéral sont susceptibles de modifier les deux boucles de contrôle, que nous pouvons alors étudier séparément en utilisant le découpage par phases précédemment proposé. En effet, nous avons émis l'hypothèse que seuls les effets de la familiarisation avec les systèmes d'aide modifieraient le contrôle en boucle ouverte (McRuer et al., 1977), alors que les effets dus au déclenchement des systèmes d'aide pendant la manœuvre d'évitement modifieraient uniquement le contrôle en boucle ouverte. De plus, comme nous pouvons le voir sur la figure 7.6, au temps t_1, les conducteurs avaient à peine commencé à dévier de leur trajectoire, et n'avaient par conséquent pas encore déclenché leur éventuel système d'aide au contrôle latéral.

Pour chaque phase, nous avons cherché à caractériser l'importance relative de la réaction et de l'anticipation des conducteurs. En effet, la réaction peut être traduite par la façon dont la situation initiale a déterminé l'action des conducteurs, alors que l'anticipation peut être traduite par la façon dont leur action a déterminé la situation finale. Nous avons ainsi évalué, pour chacune des trois phases, la corrélation entre des indicateurs décrivant la criticité de la situation initiale (au début de la phase), la réponse des conducteurs, et la criticité de la situation finale (à la fin de la phase). Cette approche est similaire à celle proposée par van Winsum et al. (1999).

Pendant la phase 1, nous avons caractérisé la criticité de la situation par l'angle de l'obstacle. Cette mesure représente la direction du camion dans le référentiel du véhicule du sujet, défini de façon à ce qu'un angle nul corresponde à un obstacle droit devant, un angle positif à un obstacle sur la droite du sujet, et un angle négatif à un obstacle sur la gauche du sujet. Fajen et Warren (2003) ont en effet montré que cet angle influençait la trajectoire d'évitement de l'obstacle. L'angle de l'obstacle a été calculé à t_0 et à t_1, et appelé respectivement θ_0 et θ_1. La figure 7.7 illustre ces deux valeurs. Ainsi, cette variable définit le niveau de criticité de la situation : comme les sujet doivent éviter le camion par la gauche, un angle de l'obstacle plus petit signifie une situation plus critique.

La réponse des conducteurs à cette situation a été mesurée par l'amplitude de la correction au volant, appelée δ_1, et la durée de la correction au volant, appelée τ_1. δ_1 correspond à la différence d'angle volant entre t_0 et t_1. τ_1 correspond à la durée de la phase 1.

Des ANOVAs à un facteur ont été réalisées avec le groupe comme variable indépendante, et δ_1 et τ_1 comme variables dépendantes. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d'expliquer δ_1 et τ_1 par θ_0, et θ_1 par δ_1 et τ_1.

Pendant la phase 2, nous avons caractérisé la criticité de la situation à t_1 par le *time-to-line-crossing* (TLC), et appelé TLC_1. Cet indicateur, défini par Godthelp et al. (1984), mesure le temps nécessaire pour le véhicule, en considérant la vitesse et l'angle volant constants, pour sortir de sa voie. Ici, TLC_1 est mesuré par rapport au bord gauche de la route. La réponse des conducteurs pendant la phase 2 a été mesurée par l'amplitude de la correction au volant, appelée δ_2, et la durée de la correction au volant, appelée τ_2, ces deux indicateurs étant calculés comme

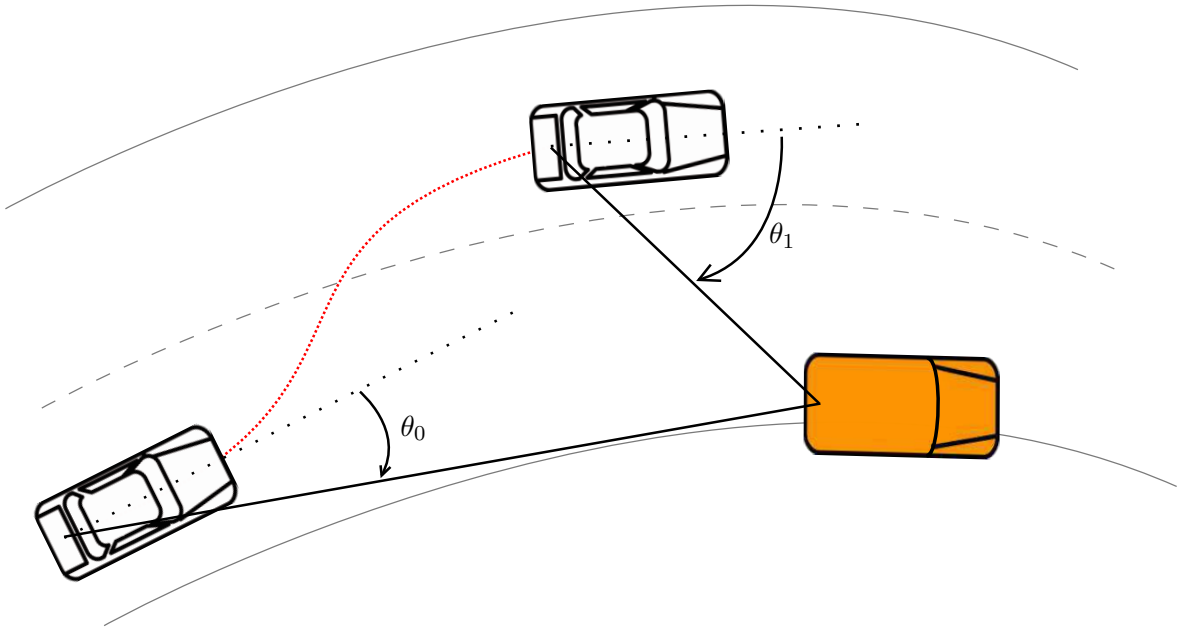


FIGURE 7.7 – Angles de l'obstacle θ_0 et θ_1, aux temps t_0 et t_1. La ligne rouge en pointillé représente la trajectoire du véhicule.

défini précédemment pour la phase 1. L'état de la situation à t_2 a été caractérisé par la position latérale, appelée ϵ_2.

Des ANOVAs à un facteur ont été réalisées avec le groupe comme variable indépendante, et δ_2 et τ_2 comme variables dépendantes. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d'expliquer δ_2 et τ_2 par TLC_1, et ϵ_2 par δ_2 et τ_2.

Pendant la phase 3, nous avons caractérisé l'état de la situation à t_2 par la position latérale, appelée ϵ_2. La réponse des conducteurs a été mesurée par le temps de stabilisation, appelé τ_3, utilisant le critère défini précédemment. τ_3 correspond donc à la durée de la phase 3.

Une ANOVA a un facteur a été réalisée avec le groupe comme variable indépendante, et τ_3 comme variable dépendante. Pour chaque groupe, des régressions linéaires ont également été réalisées, afin d'expliquer τ_3 par ϵ_2.

7.3.3 Questionnaire

Ainsi que l'ont défini van der Laan et al. (1997), les scores aux différents items du questionnaire (voir tableau 7.1) sont codés de +2 à -2 (de -2 à +2 pour les items 3,6 et 8). La moyenne des scores aux items 1,3,5,7 et 9 donne le score d'utilité, et la moyenne des scores aux items 2,4,6 et 8 donne le score de satisfaction.

Des tests de Student ont été réalisés, afin de comparer les scores d'utilité et de satisfaction entre les groupes LDW et LKA, pour chaque questionnaire. Pour chaque groupe, des tests de Student appariés ont également été réalisés, afin de comparer les scores du questionnaire "avant" et ceux du questionnaire "après". Ces tests permettent en effet de mesurer l'évolution de l'opinion des sujets après avoir testé le système d'aide à la conduite en conduite.

7.3.4 Tâche secondaire

Pour mesurer le niveau de performance à la tâche secondaire, le temps moyen de réponse à une tâche ainsi que les nombres de bonnes et de mauvaises réponses ont été enregistrés. Des ANOVAs ont ensuite été réalisées afin de comparer ces scores entre les différents groupes.

Dans cette expérimentation, la tâche secondaire était un moyen d'introduire de la distraction chez les sujets, plutôt qu'un moyen de mesure. Les sujets étaient de plus libres de répondre à cette tâche quand ils le pouvaient. Ces analyses servent donc principalement à vérifier que le taux de réponse à la tâche secondaire, et donc le niveau de distraction, était équivalent entre les groupes.

7.4 Résultats

7.4.1 Homogénéité des groupes

Il n'y avait aucune différence significative d'âge ($F(2, 24) = 0.13; p = 0.88$) ni de sexe ($\chi^2(2) = 0.07; p = 0.96$) entre les groupes.

7.4.2 Conduite normale

Ligne droite

La figure 7.8 présente les moyennes d'ICEL dans la ligne droite. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($H(2, 27) = 1.28; p = 0.53$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test n'a montré aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 1.72; p = 0.09$), ni pour le groupe LDW ($Z = 1.48; p = 0.14$), ni pour le groupe LKA ($Z = 1.48; p = 0.14$).

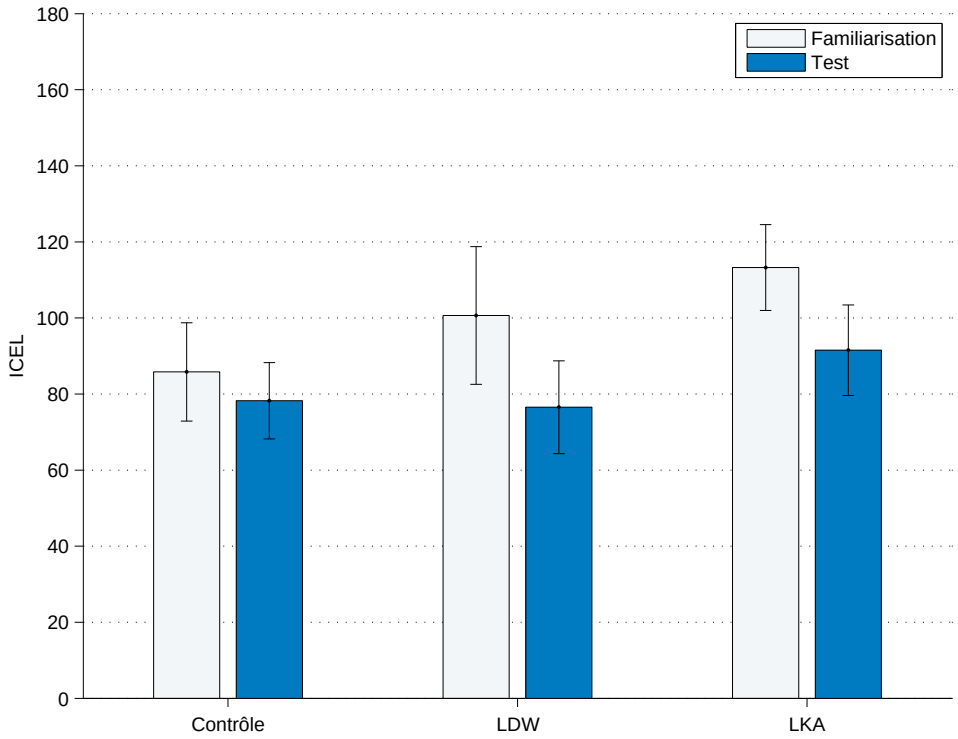


FIGURE 7.8 – Moyennes d'ICEL dans la ligne droite, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Courbe

La figure 7.9 présente les moyennes d'ICEL dans la courbe. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($F(2, 24) = 0.06; p = 0.94$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test n'a montré aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 0.77; p = 0.44$), mais une différence significative pour le groupe LDW ($Z = 2.19; p < 0.03$), et pour le groupe LKA ($Z = 2.67; p < 0.01$).

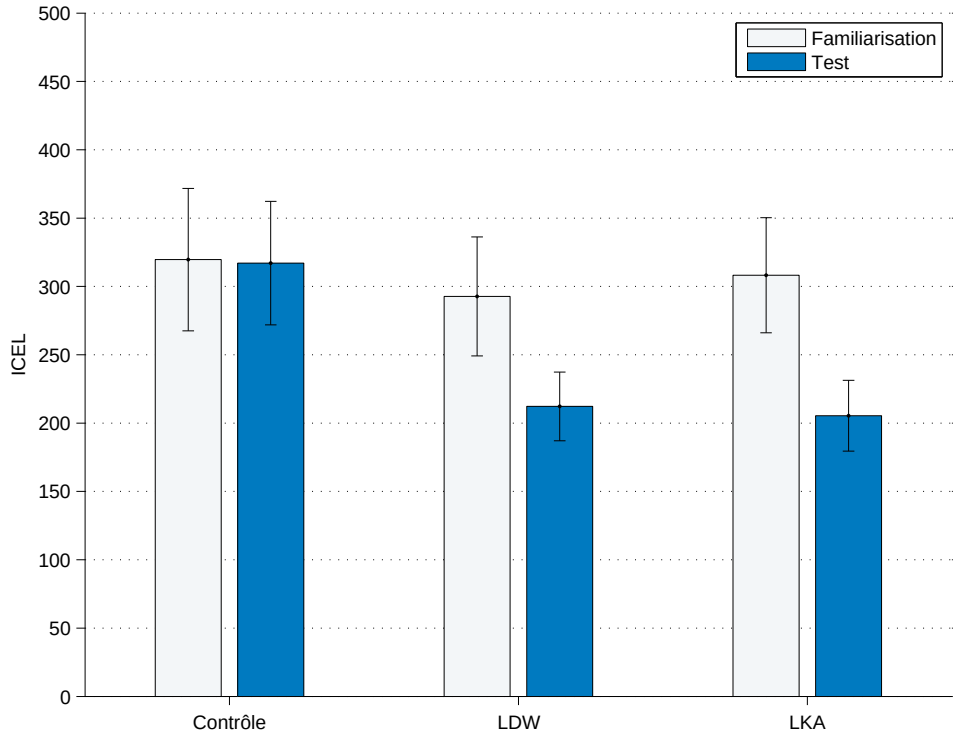


FIGURE 7.9 – Moyennes d'ICEL dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

La figure 7.10 présente les moyennes d'ICEL gauche et droite dans la courbe. Les résultats ont montré, pour le groupe LKA, une diminution significative de l'ICEL gauche lors de la conduite de test, par rapport à la conduite de familiarisation. Le tableau 7.2 résume ces résultats. Tous groupes confondus, les résultats n'ont pas montré de différence significative entre l'ICEL droite et l'ICEL gauche, que ce soit pour la conduite de familiarisation ($Z = 1.71; p = 0.09$) ou pour la conduite de test ($Z = 1.9; p = 0.06$).

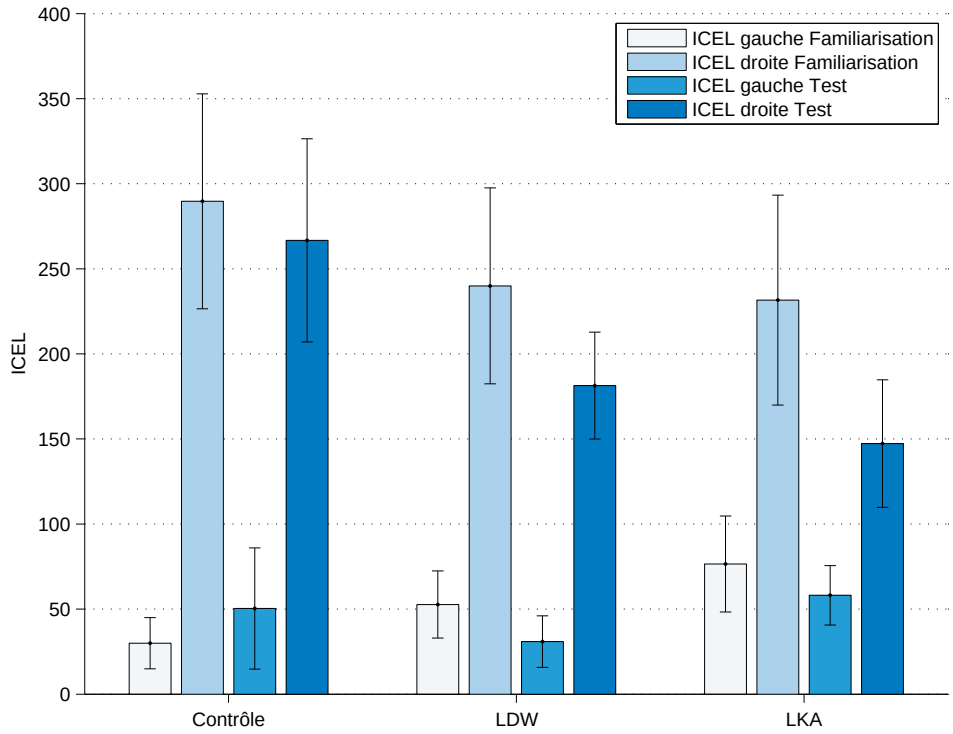


FIGURE 7.10 – Moyennes d'ICEL gauche et droite dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

TABLEAU 7.2 – Résultats des tests de Wilcoxon sur les ICEL gauche et droite, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test.

Groupe	ICEL gauche	ICEL droite
Contrôle	$Z = 1.24; p = 0.21$	$Z = 0.77; p = 0.44$
LDW	$Z = 1.95; p = 0.05$	$Z = 1.6; p = 0.11$
LKA	$Z = 2.07; p < 0.04$	$Z = 1.6; p = 0.11$

7.4.3 Situation d'urgence

Tous les sujets, de tous les groupes, ont réussi à éviter le camion. Seul un sujet du groupe LKA a perdu le contrôle de son véhicule après avoir dépassé le camion, et a quitté la route.

Indicateurs globaux

Les valeurs moyennes de TTC_0, T_{gauche}, $max(\epsilon)$ et $min(D_{obstacle})$ sont illustrées par la figure 7.11. Les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur ces indicateurs : TTC_0 ($F(2, 24) = 1.72; p = 0.20$), T_{gauche} ($H(2, 27) = 0.37; p = 0.83$), $max(\epsilon)$ ($F(2, 24) = 0.05; p = 0.95$), et $min(D_{obstacle})$ ($F(2, 24) = 2.56; p = 0.10$).

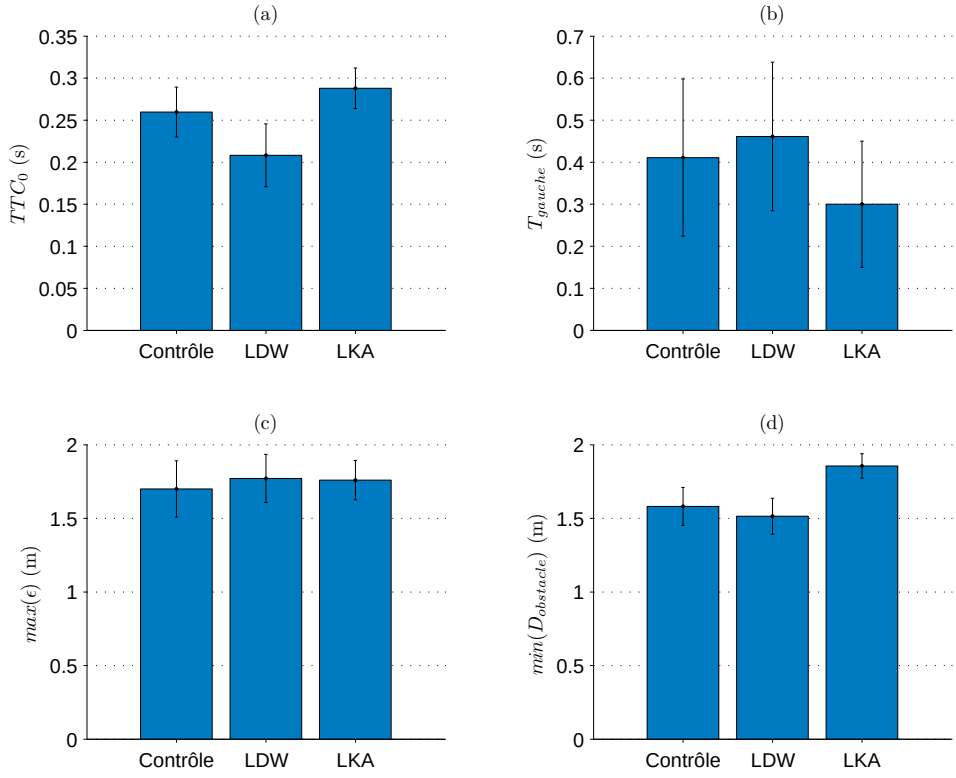


FIGURE 7.11 – Moyennes des indicateurs globaux de sécurité de la manœuvre d'évitement : (a) *time-to-collision* au début de la manœuvre ; (b) temps passé sur la voie de gauche ; (c) écart latéral maximum ; (d) distance minimale à l'obstacle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Accélération latérale

La figure 7.12 montre les valeurs d'accélération latérale maximale et de vitesse associée, en situation de conduite normale et en situation d'urgence et pour chacun des groupes.

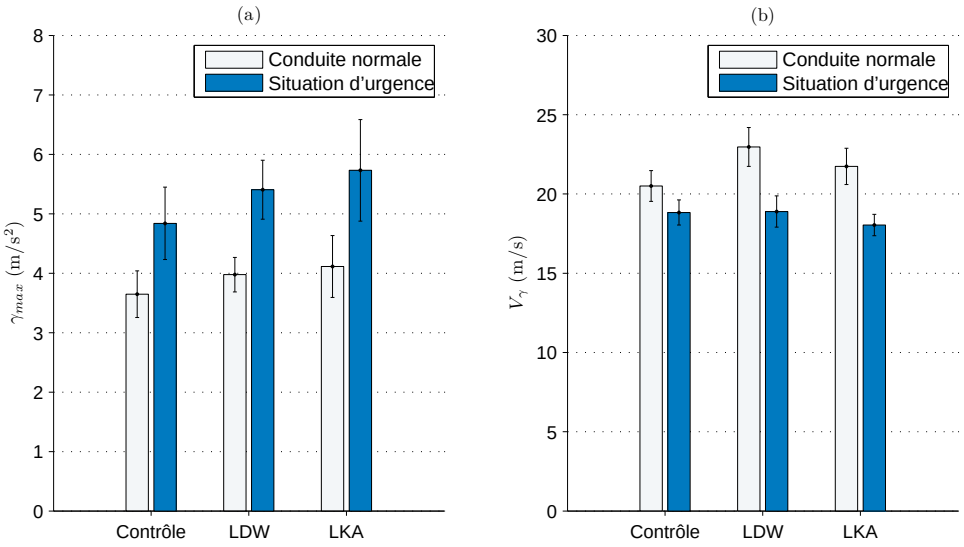


FIGURE 7.12 – (a) Accélération latérale maximale γ_{max} ; (b) Vitesse associée V_γ. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les résultats montrent une augmentation significative de l'accélération latérale maximale γ_{max} lors de la situation d'urgence ($F(1,24) = 12.29; p < 0.01$), mais pas d'effet principal du groupe sur cette mesure ($F(2,24) = 0.64; p = 0.54$).

Les résultats montrent également une diminution significative de la vitesse associée V_γ lors de la situation d'urgence ($F(1,24) = 24.51; p < 0.001$), mais pas d'effet principal du groupe sur cette mesure ($F(2,24) = 0.68; p = 0.51$).

Décomposition de la manœuvre d'évitement

Concernant la manœuvre d'évitement dans son ensemble, à t_1, la valeur de l'angle au volant était relativement faible : il était de 4.93° en moyenne ($\sigma = 14.84$), et n'était pas significativement différent de 0° ($t(26) = 1.73; p = 0.1$). Les sujets ont commencé à contrebraquer avant d'atteindre leur déviation latérale maximale ($t(26) = 28.92; p < 0.01$), 1.65 secondes plus tôt en moyenne. La valeur de θ_0 était de 8.23° en moyenne ($\sigma = 1.28$).

Phase 1

Durant la phase 1, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_1 ($F(2,24) = 0.2; p = 0.82$), ni sur τ_1 ($F(2,24) = 0.95; p = 0.4$).

Le tableau 7.3 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_1. Ces résultats montrent une corrélation significative entre θ_0 et δ_1 pour les groupes LDW et LKA, et une corrélation significative entre δ_1 et θ_1 pour les groupes contrôle et LDW.

TABLEAU 7.3 – Relations entre la situation et l'amplitude de correction au volant durant la phase 1.

	Régression de δ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur δ_1		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.425	0.254	0.064	0.737	0.024	0.477
LDW	-0.790	0.011	0.571	0.743	0.022	0.488
LKA	-0.865	0.003	0.713	-0.501	0.169	0.144

Les signes des coefficients β, dans le tableau 7.3, montrent que pour les groupes LDW et LKA, plus l'angle de l'obstacle était petit à t_0 (i.e. plus l'obstacle était à gauche), plus l'amplitude de correction au volant était importante. De la même façon, pour les groupes contrôle et LDW, plus l'amplitude de correction au volant était importante, plus l'angle de l'obstacle était grand à t_1 (i.e. plus l'obstacle était à droite).

Le tableau 7.4 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_1. Ces résultats montrent une corrélation significative entre θ_0 et τ_1 pour le groupe contrôle.

TABLEAU 7.4 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 1.

	Régression de τ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur τ_1		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.719	0.029	0.449	-0.368	0.330	0.012
LDW	-0.187	0.630	~ 0	0.163	0.674	~ 0
LKA	0.292	0.446	~ 0	0.186	0.631	~ 0

Le signe du coefficient β, dans le tableau 7.4, montre que pour le groupe contrôle, plus l'angle de l'obstacle était petit à t_0 (i.e. plus l'obstacle était à gauche), plus la durée de correction au volant était courte.

Phase 2

Durant la phase 2, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_2 ($F(2,24) = 0.58; p = 0.57$), ni sur τ_2 ($F(2,24) = 1.25; p = 0.30$).

Le tableau 7.5 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_2. Ces résultats montrent une corrélation significative entre TLC_1 et δ_2 pour le groupe LDW.

TABLEAU 7.5 – Relations entre la situation et l'amplitude de correction au volant durant la phase 2.

	Régression de δ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur δ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.477	0.195	0.117	-0.628	0.070	0.307
LDW	-0.847	0.004	0.677	0.504	0.166	0.148
LKA	-0.563	0.115	0.212	-0.102	0.794	~ 0

Le signe du coefficient β, dans le tableau 7.5, montre que pour le groupe LDW, plus le TLC était faible à t_1 (i.e. plus la sortie de route vers la gauche était imminente), plus l'amplitude de correction au volant était importante.

Le tableau 7.6 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_2. Ces résultats montrent une corrélation significative entre TLC_1 et τ_2 pour tous les groupes.

TABLEAU 7.6 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 2.

	Régression de τ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur τ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.814	0.008	0.614	0.117	0.764	~ 0
LDW	0.854	0.003	0.690	-0.660	0.053	0.355
LKA	0.760	0.018	0.517	-0.099	0.800	~ 0

Les signes des coefficients β, dans le tableau 7.6, montrent que pour tous les groupes, plus le TLC était faible à t_1 (i.e. plus la sortie de route vers la gauche était imminente), plus la durée de correction au volant était courte.

Phase 3

Durant la phase 3, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur τ_3 ($F(2, 24) = 1.77; p = 0.19$). Le tableau 7.7 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_3.

7.4.4 Questionnaire

La figure 7.13 présente les scores d'utilité et de satisfaction des questionnaires "avant" et "après". Les résultats montrent, pour le questionnaire "après", un score d'utilité significativement plus grand pour le groupe LDW que pour le groupe LKA, mais aucune différence significative entre

TABLEAU 7.7 – Relations entre la position latérale et le temps de stabilisation durant la phase 3.

	Régression de τ_3 sur ϵ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.504	0.167	0.147
LDW	0.214	0.580	~ 0
LKA	0.253	0.511	~ 0

les groupes sur le score de satisfaction. Le tableau 7.8 présente les résultats des différents tests effectués.

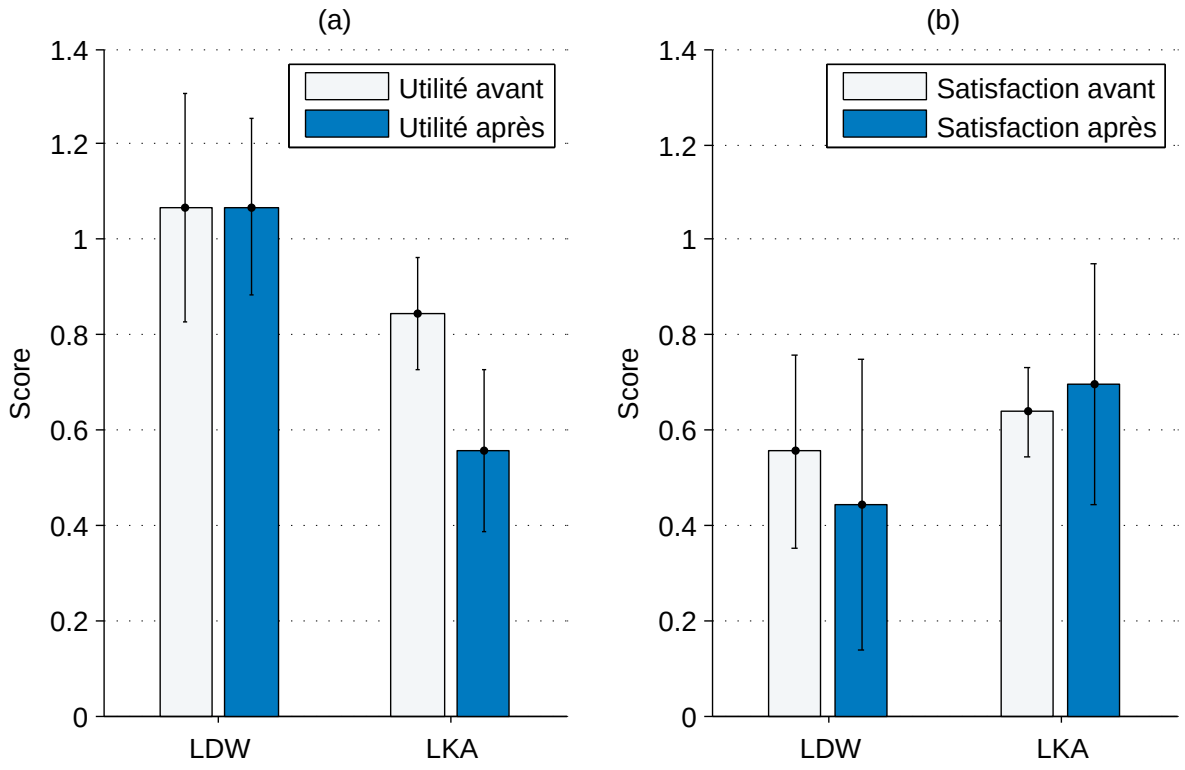


FIGURE 7.13 – Scores moyens des questionnaires "avant" et "après" : (a) utilité, (b) satisfaction. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les tests de Student appariés ne montrent pas d'évolution significative des scores entre les questionnaires "avant" et "après". Le tableau 7.9 synthétise ces résultats.

TABLEAU 7.8 – Résultats des tests de Student entre les groupes LDW et LKA.

Questionnaire	Utilité	Satisfaction
Avant	$t(16) = 0.83; p = 0.42$	$t(16) = -0.37; p = 0.71$
Après	$t(16) = 2.31; p = 0.03$	$t(16) = -0.63; p = 0.54$

TABLEAU 7.9 – Résultats des tests de Student appariés entre les questionnaires "avant" et "après".

Groupe	Utilité	Satisfaction
LDW	$t(8) = -0.21; p = 0.84$	$t(8) = 0.42; p = 0.69$
LKA	$t(8) = 1.49; p = 0.17$	$t(8) = -0.23; p = 0.82$

7.4.5 Tâche secondaire

La figure 7.14 présente les résultats de la tâche secondaire, pour chacun des groupes. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les groupes, ni sur le temps moyen de réponse ($H(2, 27) = 2.78; p = 0.25$), ni sur le nombre de bonnes réponses ($F(2, 24) = 1.39; p = 0.27$), ni sur le nombre de mauvaises réponses ($F(2, 24) = 1.12; p = 0.34$).

7.5 Discussion

7.5.1 Conduite normale

Les analyses de la conduite normale ont porté sur une ligne droite et une courbe. Lors de la conduite en ligne droite, les résultats n'ont montré aucune différence significative sur l'ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. Les systèmes d'aide au contrôle latéral semblent donc ne pas avoir introduit de changement sur le contrôle latéral en ligne droite. En revanche, lors de la conduite en courbe, les résultats ont montré des différences significatives d'ICEL entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. En effet, pour les sujets des groupes LDW et LKA, l'ICEL était plus faible pendant la conduite de test que pendant la conduite de familiarisation. Il semble donc que les systèmes LDW et LKA ont poussé les sujets, lors d'une conduite en courbe, à adopter une trajectoire de conduite plus proche du centre de la voie.

Une analyse plus approfondie a été réalisée, afin de déterminer plus précisément comment ces systèmes d'aide ont modifié la trajectoire des conducteurs, et si leur effet portait plutôt sur les déviations vers la gauche ou sur les déviations vers la droite (la courbe était orientée vers la droite). En séparant ainsi l'ICEL en ICEL gauche et ICEL droite, les résultats n'ont montré, pour les sujets du groupe LDW, aucune différence significative sur aucun de ces deux indicateurs, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test. La réduction d'ICEL observée avec ce système n'est donc pas particulièrement marquée vers la gauche ou vers la droite, mais répartie

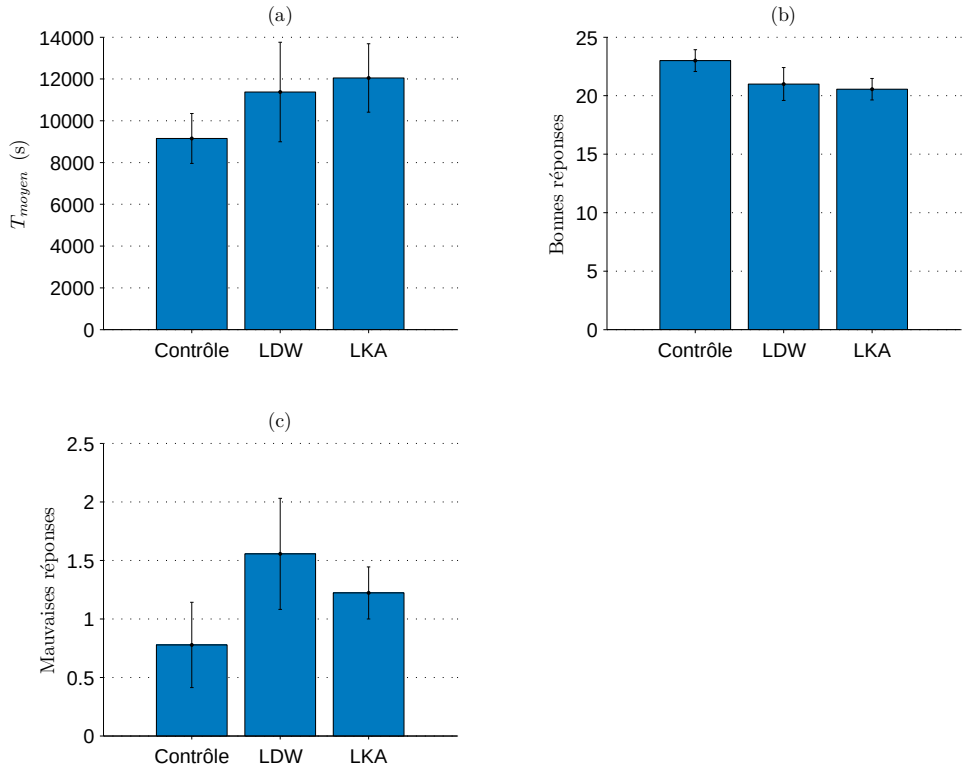


FIGURE 7.14 – Résultats de la tâche secondaire, pour chaque groupe : (a) temps moyen de réponse à une tâche, (b) nombre de bonnes réponses, (c) nombre de mauvaises réponses. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

entre les deux. En revanche, pour les sujets du groupe LKA, les résultats n'ont montré aucune différence significative sur l'ICEL droite, mais une diminution significative de l'ICEL gauche pendant la conduite de test. Ce système d'aide a donc principalement empêché les déviations vers la gauche, soit vers l'extérieur de la courbe. Nous pensons donc qu'à vitesse plus élevée, un tel système pourrait réduire les risques de sous-virage.

Il est également intéressant de noter que ces résultats confirment la pertinence par rapport à ces systèmes d'aide de la situation d'urgence étudiée dans ce chapitre. En effet, son but était d'illustrer une situation où une action d'urgence était nécessaire au niveau du contrôle latéral, mais pour laquelle les systèmes d'aide n'assistaient pas les conducteurs. Ici, l'obstacle à éviter se trouvait sur la droite de la route, à la sortie d'un virage vers la droite. Les résultats précédemment cités montrent donc que ni le LDW ni le LKA n'ont aidé les conducteurs à se placer dans une position plus propice à l'évitement de l'obstacle. En revanche, en se basant sur ces mêmes résultats, nous pensons que la situation serait très différente dans le cas d'une situation d'urgence identique mais ayant lieu à la sortie d'un virage vers la gauche. Dans ce cas en effet, les sujets utilisant le LKA seraient vraisemblablement dans une position initiale facilitant l'évitement de l'obstacle (soit moins vers l'extérieur du virage).

7.5.2 Situation d'urgence

Globalement, les sujets ont réussi à éviter le camion assez facilement. Ils ont pour cela donné un coup de volant vers la gauche d'amplitude relativement faible, et ont contrebraqué rapidement. Ils ont en effet commencé à contrebraquer avant d'atteindre leur déviation latérale maximale vers la gauche, cela confirmant une manœuvre d'évitement souple. Cela est probablement dû à la courbure de la route (l'évènement se produisant en sortie d'un virage à droite), qui leur a permis de dévier rapidement de leur trajectoire. Contrairement aux manœuvres de dépassement (voir par exemple Younsi et al. (2009)), cette manœuvre ne présentait pas de phase de stabilisation sur la voie de gauche, probablement en raison de la plus grande différence de vitesse entre les véhicules.

Les résultats sur l'accélération latérale ont montré que lors de la situation d'urgence, les sujets ont atteint une accélération latérale maximale plus importante que lors d'une prise de virage normale, tout en adoptant cependant une vitesse plus faible. Cela confirme le caractère urgent et inattendu de la manœuvre d'évitement, pour laquelle les conducteurs n'ont pas pu limiter l'accélération latérale comme lors d'une prise de virage normale, tel que le suggèrent Reymond et al. (2001).

Les résultats pour la première phase de l'évitement, à savoir le coup de volant rapide, suggèrent que la réaction des sujets du groupe LKA était principalement déterminée par la criticité de la situation initiale (soit l'angle de l'obstacle). En revanche, la réaction des sujets du groupe contrôle était principalement déterminée par la criticité de la situation finale (soit l'angle de l'obstacle après le coup de volant). Pour les sujets du groupe LDW, représentant un niveau d'automatisation intermédiaire, ces deux relations ont été observées conjointement. Ces résultats

tendent donc à montrer que l'automatisation a généré plus de réaction et moins d'anticipation chez les conducteurs, lors de la situation d'urgence.

Dans le cadre de cette expérimentation, l'amplitude de variation de l'angle de l'obstacle était plutôt restreinte mais, étant donnés ces résultats, nous pensons que des valeurs plus extrêmes de l'angle de l'obstacle entraîneraient une plus grande amplitude de correction au volant, particulièrement pour les conducteurs utilisant le LKA. De telles situations pourraient donc poser des difficultés pour reprendre le contrôle du véhicule après l'évitement. Dans cette expérimentation, un sujet du groupe LKA a perdu le contrôle de son véhicule. Bien que ce cas unique n'entraîne pas de différence significative entre les groupes, nous pensons qu'une situations plus critique (i.e. présentant un angle de l'obstacle plus petit, ce qui pourrait être obtenu soit en plaçant le camion plus à gauche, soit reproduisant l'évènement à un emplacement où le rayon de courbure de la route est plus faible) pourrait accentuer ce phénomène.

A l'inverse, les effets des systèmes d'aide au contrôle latéral pendant la deuxième et la troisième phase de l'évitement (à savoir, le contrebraquage vers la droite et la stabilisation sur la voie de droite, respectivement) apparaissent limités. Les différences observées portaient principalement sur la première phase. Par conséquent, les résultats supportent donc plutôt l'hypothèse d'un effet des systèmes d'aide au contrôle latéral sur le contrôle en boucle ouverte, effet dû à l'apprentissage passé avec les systèmes d'aide.

7.5.3 Questionnaire

Les évaluations subjectives des systèmes d'aide au contrôle latéral par les sujets, après la conduite de test, ont montré que le système LDW a été jugé plus utile que le système LKA. En revanche, aucune différence significative entre LDW et LKA n'a été montrée sur la satisfaction, ni sur l'évolution de ces deux scores entre les questionnaires "avant" et "après". Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse posée par Navarro et al. (2010), selon laquelle l'acceptation et l'efficacité réelle d'un système d'aide à la conduite ne sont pas nécessairement corrélées. Dans l'expérimentation présentée dans ce chapitre, les sujets ont en effet évalué le système LKA moins efficace que le système LDW, alors que les résultats des analyses sur les indicateurs objectifs de la conduite ont montré une efficacité comparable de ces deux systèmes.

7.5.4 Tâche secondaire

Les résultats n'ont montré aucune différence significative de performance à la tâche secondaire entre les groupes. Ils confirment ainsi que le niveau de distraction volontairement créée par la tâche secondaire était équivalent pour tous les groupes.

7.6 Conclusion

Dans cette expérimentation, nous avons utilisé un simulateur de conduite statique, afin d'étudier la réaction des conducteurs lors d'une manœuvre d'évitement d'obstacle, en présence d'un système d'aide au contrôle latéral. Nous avons pour cela utilisé deux niveaux d'automatisation différents. Les résultats ont tout d'abord confirmé l'efficacité des systèmes d'aide au contrôle latéral pour améliorer le contrôle latéral lors de la conduite en courbe, et ont montré que les conducteurs assistés aussi bien que non assistés ont réussi à éviter l'obstacle.

Cependant, une analyse détaillée de la manœuvre d'évitement a donné des résultats prometteurs, suggérant un effet des systèmes d'aide au contrôle latéral dans la première phase de la manœuvre (le coup de volant rapide), qui est supposée impliquer principalement du contrôle en boucle ouverte (Reid, 1983). En effet, la réaction des sujets conduisant avec un système d'aide au contrôle latéral pendant cette phase était déterminée par le niveau de criticité de la situation initiale (spécialement pour un système d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation élevé). A l'inverse, chez les sujets conduisant avec un système d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation intermédiaire, ou sans système d'aide, la réaction pendant cette phase déterminait le niveau de sécurité final. Ces résultats suggèrent un possible effet négatif des systèmes d'aide au contrôle latéral présentant un niveau d'automatisation élevé, lors de situations d'urgence plus critiques.

Nos résultats tendent également à montrer que l'influence des systèmes d'aide au contrôle latéral lors de la situation d'urgence est plus vraisemblablement une modification du comportement des conducteurs due à l'apprentissage préalable de ces systèmes, plutôt qu'une gêne due au déclenchement de ces systèmes pendant la manœuvre d'évitement.

Au cours de nos futures études, nous chercherons à créer de nouveaux scénarios d'urgence, afin d'accentuer les tendances observées dans cette expérimentation. Dans cette optique, le chapitre suivant présente une nouvelle expérimentation, dans laquelle une situation d'urgence plus critique a été utilisée, ainsi qu'un simulateur dynamique, l'apport de la restitution de mouvement dans le contrôle latéral étant connu (Kemeny et Panerai, 2003). De tels scénarios pourraient être utiles dans le futur, pour étudier la réaction des conducteurs dans les phases amont de la conception des systèmes d'aide à la conduite.

Chapitre 8

Assistance au contrôle latéral et situation d'urgence : expérience sur simulateur dynamique

8.1 Introduction

L'expérimentation présentée dans le chapitre précédent, réalisée sur simulateur statique, avait pour objectif d'étudier le comportement des conducteurs en situation d'urgence, pour différents niveaux d'assistance au contrôle latéral : pas d'assistance, assistance de type Lane Departure Warning et assistance de type Lane Keeping Assistant. La situation d'urgence présentée aux sujets était un camion à éviter à la sortie d'un virage.

Les résultats ont montré que les sujets, quel que soit leur niveau d'assistance, arrivaient à éviter le camion assez aisément. Néanmoins, une analyse plus approfondie a dégagé quelques différences de comportement dans la manœuvre d'évitement, principalement dans la première phase utilisant le contrôle en boucle ouverte.

L'expérimentation présentée dans ce chapitre se base sur les résultats de l'expérimentation présentée dans le chapitre précédent, et se propose d'aller plus loin en tentant d'accentuer les tendances précédemment décrites. Elle en reprend le principe général ainsi que le protocole. En revanche, le scénario de la situation d'urgence a été revu, afin d'augmenter le niveau de criticité de celle-ci et de mettre les conducteurs en plus grande difficulté. De plus, un simulateur dynamique a été utilisé, afin de mieux reproduire, à l'aide de la restitution de mouvements, le danger ressenti dans de telles situations.

8.2 Méthode

8.2.1 Matériel

L'expérimentation a été menée sur le simulateur dynamique *Ultimate* (Dagdelen et al., 2006) du Centre Technique de Simulation de Renault (voir 4.3.2). Le simulateur est constitué d'une cabine équipée d'un tableau de bord de Renault Laguna complet. L'image est projetée sur un écran cylindrique offrant un champ de vision de 150°. Deux écrans LCD sont placés dans les rétroviseurs extérieurs, et l'image du rétroviseur central est projetée sur la partie haute de l'écran principal. Les mouvements du véhicule sont restitués à l'aide d'une plateforme à 6 degrés de liberté, ainsi que d'un système de rails offrant une amplitude de déplacement de 7 m par 7 m.

La tâche secondaire était affichée sur un écran embarqué placé en haut de la colonne centrale du tableau de bord. Un petit clavier (de type pavé numérique) était placé devant le levier de vitesse. La figure 8.1 illustre le dispositif expérimental.

8.2.2 Participants

33 personnes ont participé à cette expérimentation (25 hommes et 8 femmes). Toutes étaient employées chez Renault. Les participants avaient un âge moyen de 33 ans ($\sigma = 9$), un permis de conduire valide depuis 14.4 ans en moyenne ($\sigma = 9.2; min = 3$), et n'étaient pas des pilotes experts. Leur kilométrage annuel moyen était de 14764 km ($\sigma = 11266$). Tous les sujets avaient une vision normale ou corrigée à la normale.

8.2.3 Protocole

Déroulement

Le parcours suivi par les participants était le même que lors de l'expérimentation présentée au chapitre précédent.

Situation d'urgence

Par rapport à l'expérimentation présentée au chapitre précédent, l'objectif était d'augmenter la criticité de la situation d'urgence. Comme le critère de l'angle de l'obstacle a été retenu pour décrire cette criticité, et que les résultats de l'expérimentation précédente ont montré que la réaction des sujets dépendait de cette grandeur, nous avons cherché à diminuer la valeur de l'angle. Pour cela, le camion a été déplacé de 75 cm sur la gauche, le rapprochant ainsi du centre de la route.



FIGURE 8.1 – Dispositif expérimental.

Questionnaire

Comme pour l'expérimentation présentée au chapitre précédent, les participants des groupes LDW et LKA ont complété un questionnaire sur l'acceptation subjective d'un système d'aide à la conduite, proposé par van der Laan et al. (1997). Voir le chapitre précédent pour plus de détails sur le questionnaire.

8.3 Analyse de données

8.3.1 Conduite normale

L'intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL, voir 7.3.1) a été calculée sur les deux mêmes portions de route que pour l'expérimentation précédente, une ligne droite et une courbe.

Sur les données de la ligne droite et de la courbe, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé sur l'ICEL lors de la conduite de familiarisation afin de vérifier l'absence de biais dans la répartition des groupes.

Ensuite, des tests de Wilcoxon, pour chacun des groupes, ont été réalisés afin d'évaluer l'apport des systèmes d'aide lors de la conduite de test, par rapport à la conduite de familiarisation. Sur l'ICEL lors de la conduite en courbe, ces tests ont également été réalisés séparément sur l'ICEL gauche et sur l'ICEL droite (voir 7.3.1).

8.3.2 Situation d'urgence

Au cours de la situation d'urgence, un sujet (du groupe LDW) s'est arrêté complètement avant l'obstacle. Sa manœuvre d'évitement ne correspondant alors pas à une réaction d'urgence, ce sujet a été exclu de la suite des analyses.

Indicateurs globaux

Comme pour l'expérimentation précédente, afin d'évaluer la sécurité globale de la manœuvre d'évitement, les indicateurs suivant ont été calculés :
- Le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, noté TTC_0.
- Le temps passé sur la voie de gauche pendant l'évitement, noté T_{gauche}.
- L'écart latéral maximum pendant l'évitement, noté $max(\epsilon)$, mesuré par rapport au centre de la voie de droite.
- La distance minimale à l'obstacle pendant l'évitement, notée $min(D_{obstacle})$. Cette distance est une distance euclidienne.

L'indicateur suivant a également été calculé :
– La distance à l'obstacle au début de la manœuvre d'évitement, notée D_0. Cette distance est une distance curviligne, correspondant à la distance inter-véhiculaire suivant le tracé de la route.

Accélération latérale

La figure 8.2 représente un exemple d'enregistrement de l'accélération latérale en fonction de la vitesse, tout au long de la conduite de test (qui inclue donc la situation d'urgence).

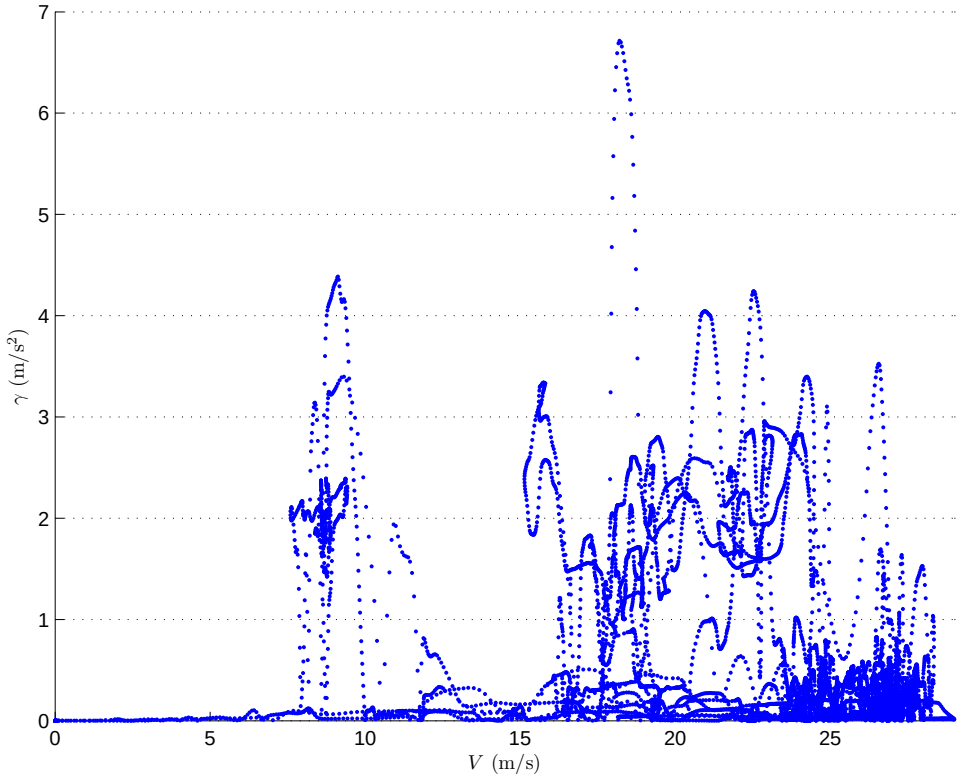


FIGURE 8.2 – Représentation de l'accélération latérale γ en fonction de la vitesse V pendant la conduite de test. Exemple pour un sujet.

Comme pour l'expérimentation présentée dans le chapitre précédent, nous pouvons observer chez la majorité des sujets un pic d'accélération latérale correspondant à la manœuvre d'évitement de l'obstacle. L'enregistrement illustré par la figure 8.2 montre ainsi un pic d'accélération latérale à presque $7m/s^2$, pour une vitesse légèrement inférieure à $20m/s$.

Pour chaque sujet, les valeurs d'accélération latérale maximale et de vitesse associée ont donc été calculées au cours de la manœuvre d'évitement ainsi qu'au cours de la conduite de familiarisation

(voir section 7.3.2 au chapitre précédent), et des ANOVAs à mesures répétées ont été réalisées sur ces valeurs.

Décomposition de la manœuvre d'évitement

Pour cette expérimentation, nous avons observé dans la manœuvre d'évitement les mêmes phases que lors de l'expérimentation précédente, à savoir :

1. Phase 1 : coup de volant vers la gauche
2. Phase 2 : contrebraquage vers la droite
3. Phase 3 : stabilisation du volant autour de la position centrale

En revanche, contrairement à l'expérimentation précédente, certain sujets ont montré ici une courte stabilisation entre le coup de volant vers la gauche et le contrebraquage. Le découpage a donc été légèrement modifié ainsi :

1. t_0 : Début du coup de volant vers la gauche
2. t_1 : Fin du coup de volant
3. t_2 : Début du contrebraquage
4. t_3 : Fin du contrebraquage et début de la stabilisation
5. t_4 : Fin de la stabilisation

La figure 8.3 présente un exemple de manœuvre d'évitement avec le découpage associé, pour un sujet présentant une courte stabilisation entre t_1 et t_2.

8.3.3 Questionnaire

Pour chacun des deux questionnaires "avant" et "après", les scores d'utilité et de satisfaction ont été calculés pour les groupes LDW et LKA. Des tests de Student et de Mann-Whitney ont été réalisés pour évaluer les différences entre les deux groupes pour ces scores. Des tests de Student appariés et de Wilcoxon ont également été réalisés, afin d'évaluer l'évolution de ces scores entre les deux questionnaires, pour chacun des deux groupes.

8.3.4 Tâche secondaire

Comme dans le chapitre précédent (voir 7.3.4), le temps moyen de réponse à une tâche ainsi que les nombres de bonnes et de mauvaises réponses ont été enregistrés. Des ANOVAs ont ensuite été réalisées afin de comparer ces scores entre les différents groupes.

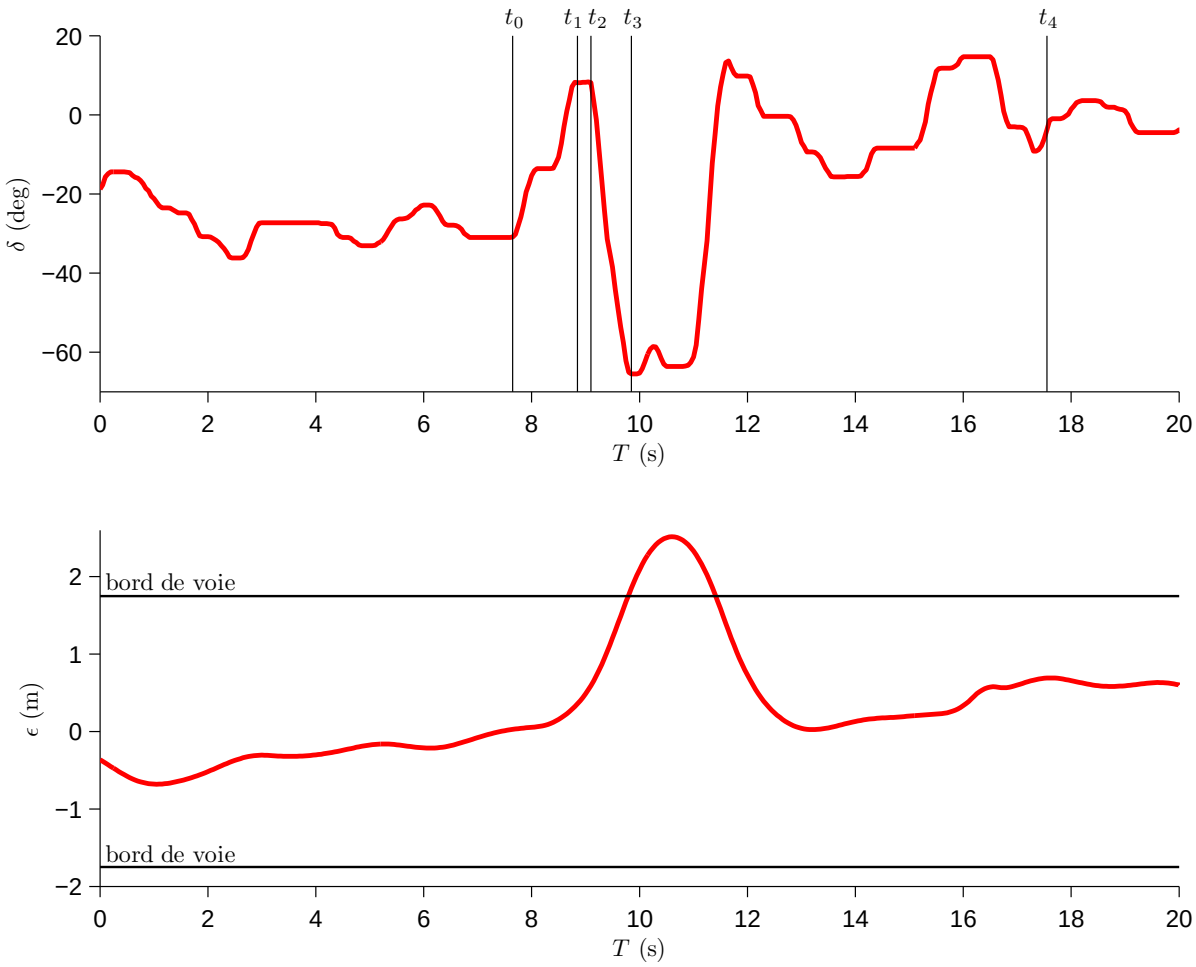


FIGURE 8.3 – Exemple d'une manœuvre d'évitement. Le graphique du dessus montre l'angle volant δ en fonction du temps. Le graphique du dessous montre l'écart latéral ϵ en fonction du temps. Les valeurs positives correspondent à un angle volant ou un écart latéral vers la gauche.

8.4 Résultats

8.4.1 Homogénéité des groupes

Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'âge ($H(2, 33) = 2.27; p = 0.32$) ni de sexe ($\chi^2(2) = 0.04; p = 0.98$) entre les groupes.

8.4.2 Conduite normale

Ligne droite

La figure 8.4 présente les moyennes d'ICEL dans la ligne droite. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($H(2, 33) = 1.56; p = 0.46$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test n'a montré aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 1.16; p = 0.25$), ni pour le groupe LDW ($Z = 0.18; p = 0.86$), ni pour le groupe LKA ($Z = 0.71; p = 0.48$).

Courbe

La figure 8.5 présente les moyennes d'ICEL dans la courbe. Les résultats n'ont montré aucune différence significative d'ICEL entre les groupes durant la conduite de familiarisation ($H(2, 33) = 0.95; p = 0.62$). La comparaison entre l'ICEL pendant la conduite de familiarisation et pendant la conduite de test a montré une diminution significative de l'ICEL pendant la conduite de test pour le groupe LKA ($Z = 2.49; p < 0.02$), mais aucune différence significative pour le groupe contrôle ($Z = 0.62; p = 0.53$) et pour le groupe LDW ($Z = 0.27; p = 0.79$).

La figure 8.6 présente les moyennes d'ICEL gauche et droite dans la courbe. Les résultats ont montré une différence significative, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test, uniquement pour le groupe LKA sur l'ICEL gauche. Le tableau 8.1 résume ces résultats. Tous groupes confondus, les résultats n'ont pas montré de différence significative entre l'ICEL droite et l'ICEL gauche, que ce soit pour la conduite de familiarisation ($Z = 1.87; p = 0.06$) ou pour la conduite de test ($Z = 1.71; p = 0.09$).

8.4.3 Situation d'urgence

Tous les sujets ont réussi à éviter l'obstacle, sauf un sujet du groupe LKA qui est entré en collision avec le camion. En revanche, ce cas unique n'est pas suffisant pour avoir une différence significative entre les groupes ($\chi^2(2) = 0.26; p = 0.88$).

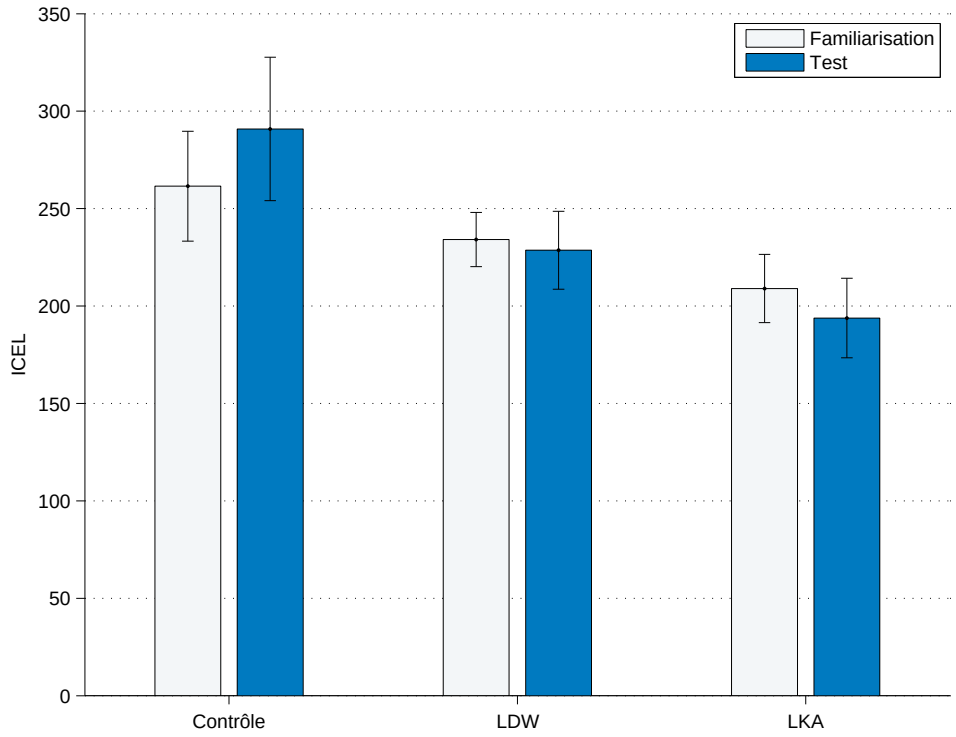


FIGURE 8.4 – Moyennes d'ICEL dans la ligne droite, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

TABLEAU 8.1 – Résultats des tests de Wilcoxon sur les ICEL gauche et droite, entre la conduite de familiarisation et la conduite de test.

Groupe	ICEL gauche	ICEL droite
Contrôle	$Z = 0.36; p = 0.72$	$Z = 0.62; p = 0.53$
LDW	$Z = 0.36; p = 0.72$	$Z = 0.18; p = 0.86$
LKA	$Z = 1.42; p = 0.15$	$Z = 1.33; p = 0.18$

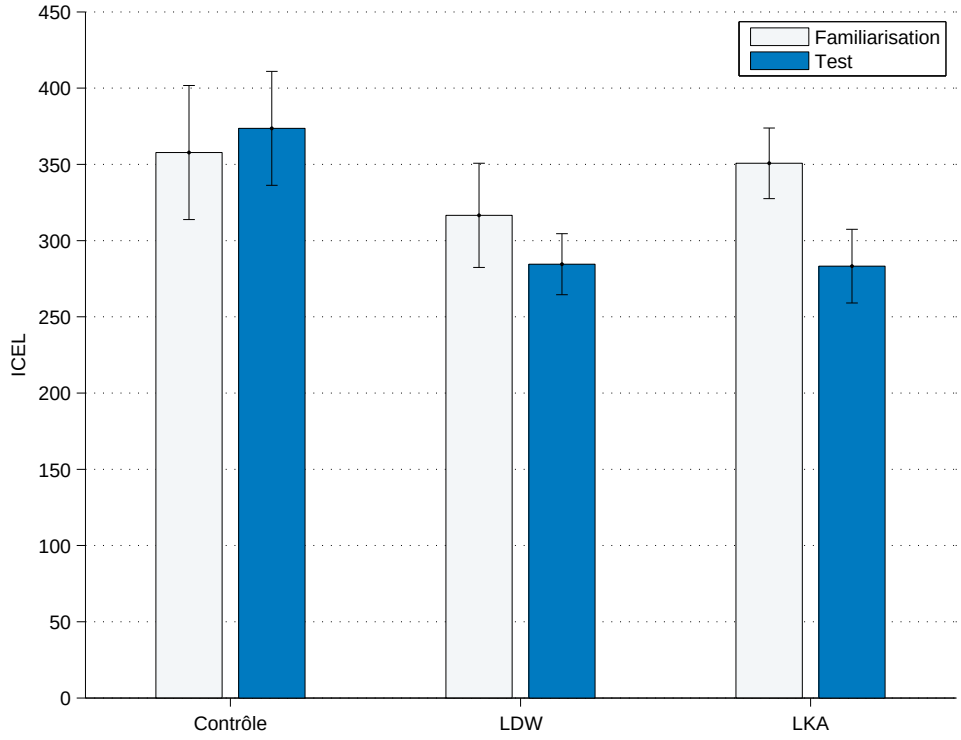


FIGURE 8.5 – Moyennes d'ICEL dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

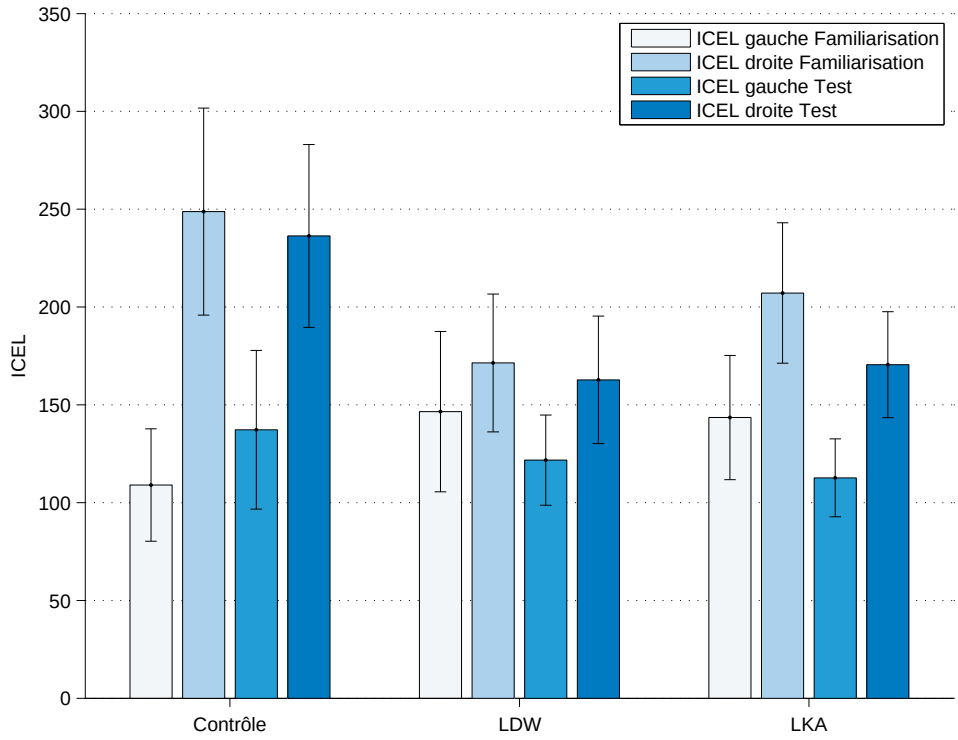


FIGURE 8.6 – Moyennes d'ICEL gauche et droite dans la courbe, pour chacun des groupes. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Lors de l'évitement de l'obstacle, quatre sujets ont complètement arrêté leur véhicule (un du groupe contrôle, deux du groupe LDW et un du groupe LKA, sans différence significative entre les groupes, $\chi^2(2) = 0.08; p = 0.96$). Parmi ces quatre sujets, trois se sont arrêtés après l'évitement du camion, et un (du groupe LDW) s'est arrêté avant. Ce dernier a donc été retiré de la suite des analyses, son comportement pour éviter le camion ne reflétant pas une réaction d'urgence.

Indicateurs globaux

Les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur T_{gauche} ($F(2, 29) = 2.42; p = 0.11$), ni sur $min(D_{obstacle})$ ($F(2, 29) = 1.45; p = 0.25$), mais un effet significatif sur $max(\epsilon)$ ($F(2, 29) = 3.86; p = 0.03$). Les analyses post-hoc montrent que la valeur de $max(\epsilon)$ est significativement inférieure pour le groupe LKA que pour le groupe contrôle ($p < 0.01$).

Les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur TTC_0 ($F(2, 29) = 2.64; p = 0.09$), mais un effet significatif sur D_0 ($F(2, 29) = 3.61; p = 0.04$). Les analyses post-hoc montrent que la valeur de D_0 est significativement supérieure pour le groupe LKA que pour le groupe LDW ($p = 0.02$).

La figure 8.7 regroupe les valeurs moyennes de tous ces indicateurs : TTC_0, T_{gauche}, $max(\epsilon)$ $min(D_{obstacle})$ et D_0.

Accélération latérale

La figure 8.8 montre les valeurs d'accélération latérale maximale et de vitesse associée, en situation de conduite normale et en situation d'urgence et pour chacun des groupes.

Les résultats sur l'accélération latérale maximale γ_{max} ne montrent ni un effet principal de la situation d'urgence ($F(1, 29) = 3.37; p = 0.08$), ni un effet principal du groupe ($F(2, 29) = 0.01; p = 0.99$).

En revanche, les résultats montrent une diminution significative de la vitesse associée V_γ lors de la situation d'urgence ($F(1, 29) = 10.68; p < 0.01$), mais pas d'effet principal du groupe sur cette mesure ($F(2, 29) = 0.43; p = 0.65$).

Décomposition de la manœuvre d'évitement

L'angle volant atteint à t_1 était de 10.39° en moyenne ($\sigma = 18.35$), et était significativement différent de 0° ($t(31) = 3.2; p < 0.01$). Les sujets ont commencé à contrebraquer avant d'atteindre leur déviation latérale maximale (1.82s plus tôt en moyenne, $t(31) = 24.96; p < 0.01$). La valeur de θ_0 était de 8.67° en moyenne ($\sigma = 1.73$).

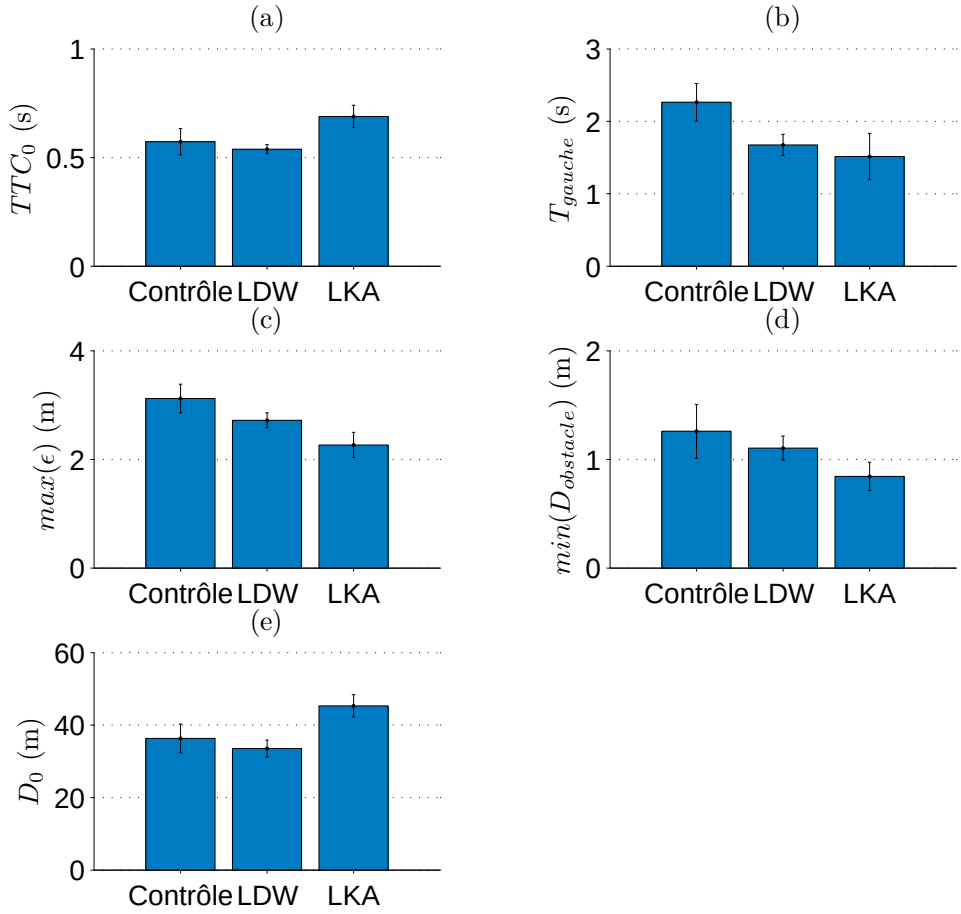


FIGURE 8.7 – Moyennes des indicateurs globaux de sécurité de la manœuvre d'évitement : (a) *time-to-collision* au début de la manœuvre ; (b) temps passé sur la voie de gauche ; (c) écart latéral maximum ; (d) distance minimale à l'obstacle ; (e) distance inter-véhicules au début de la manœuvre. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

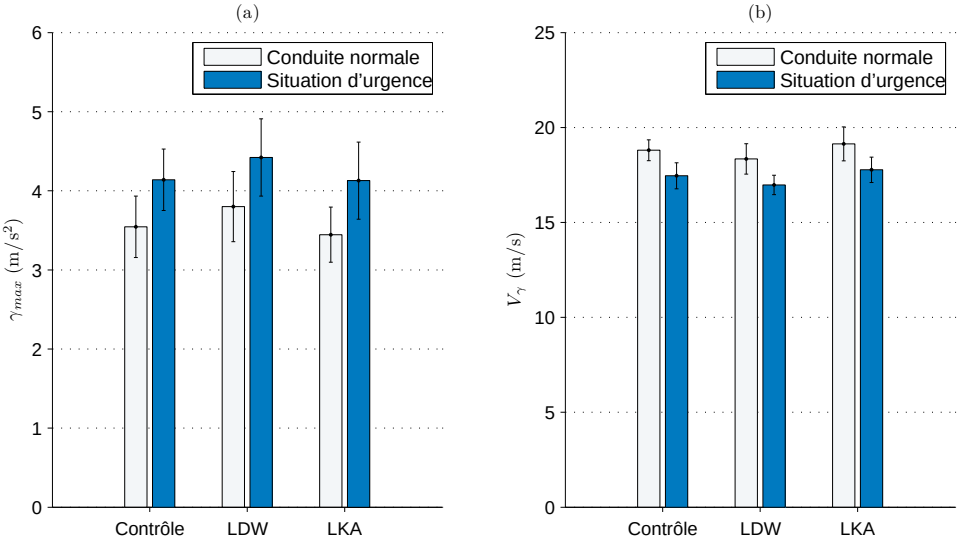


FIGURE 8.8 – (a) Accélération latérale maximale γ_{max} ; (b) Vitesse associée V_γ. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Phase 1

Durant la phase 1, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_1 ($F(2, 29) = 2.02; p = 0.15$), ni sur τ_1 ($H(2, 32) = 0.33; p = 0.85$).

Le tableau 8.2 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_1.

TABLEAU 8.2 – Relations entre la situation et l'amplitude de correction au volant durant la phase 1.

	Régression de δ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur δ_1		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.009	0.979	~ 0	0.432	0.185	0.096
LDW	-0.462	0.179	0.115	0.401	0.25	0.056
LKA	-0.532	0.092	0.204	0.293	0.383	~ 0

Le tableau 8.3 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_1. Ces résultats montrent une corrélation significative entre τ_1 et θ_1 pour le groupe LKA.

Phase 2

Durant la phase 2, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe, ni sur δ_2 ($H(2, 32) = 1.55; p = 0.46$), ni sur τ_2 ($F(2, 29) = 0.63; p = 0.54$).

TABLEAU 8.3 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 1.

	Régression de τ_1 sur θ_0			Régression de θ_1 sur τ_1		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.183	0.589	~ 0	0.037	0.914	~ 0
LDW	-0.487	0.685	~ 0	0.519	0.072	0.268
LKA	0.49	0.126	0.155	0.779	0.005	0.563

Le tableau 8.4 résume les résultats des régressions linéaires sur δ_2. Ces résultats montrent une corrélation significative entre δ_2 et ϵ_2 pour le groupe LKA.

TABLEAU 8.4 – Relations entre la situation et l'amplitude de correction au volant durant la phase 2.

	Régression de δ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur δ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.449	0.166	0.113	0.14	0.682	~ 0
LDW	-0.261	0.467	~ 0	0.099	0.786	~ 0
LKA	-0.003	0.992	~ 0	0.624	0.04	0.321

Le tableau 8.5 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_2.

TABLEAU 8.5 – Relations entre la situation et la durée de correction au volant durant la phase 1.

	Régression de τ_2 sur TLC_1			Régression de ϵ_2 sur τ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	0.488	0.128	0.153	0.32	0.337	0.003
LDW	0.341	0.335	0.006	0.287	0.422	~ 0
LKA	0.225	0.505	~ 0	0.028	0.935	~ 0

Phase 3

Durant la phase 3, les résultats n'ont montré aucun effet significatif du groupe sur τ_3 ($H(2, 32) = 0.54; p = 0.76$). Le tableau 8.6 résume les résultats des régressions linéaires sur τ_3.

8.4.4 Questionnaire

La figure 8.9 présente les scores d'utilité et de satisfaction des questionnaires "avant" et "après". Les résultats ne montrent aucune différence significative entre les groupes. Le tableau 8.7 présente les résultats des différents tests effectués.

TABLEAU 8.6 – Relations entre la position latérale et le temps de stabilisation durant la phase 3.

	Régression de τ_3 sur ϵ_2		
Groupe	β	p	R^2 ajusté
Contrôle	-0.277	0.409	~ 0
LDW	0.142	0.696	~ 0
LKA	0.513	0.106	0.181

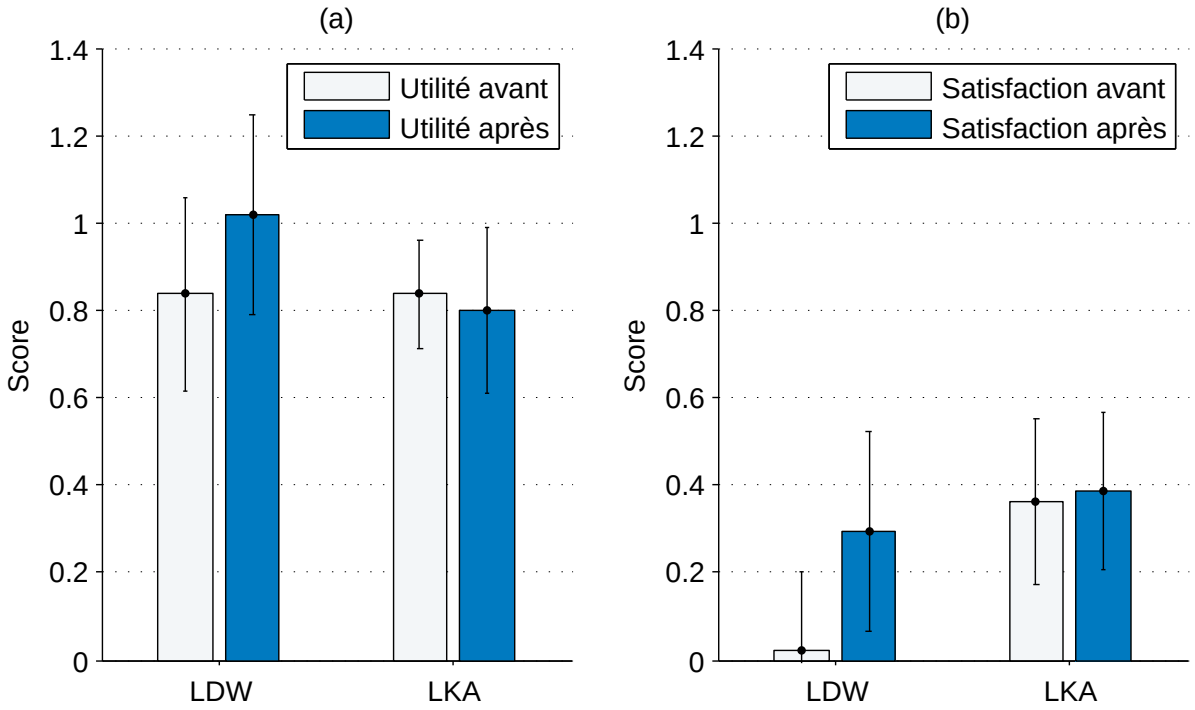


FIGURE 8.9 – Scores moyens des questionnaires "avant" et "après" : (a) utilité, (b) satisfaction. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

TABLEAU 8.7 – Résultats des tests de Student entre les groupes LDW et LKA.

Questionnaire	Utilité	Satisfaction
Avant	$t(20) = 0; p = 1$	$t(20) = -1.31; p = 0.21$
Après	$U = 43; p = 0.25$	$t(20) = -0.31; p = 0.76$

Les tests appariés montrent une augmentation significative du score d'utilité entre les questionnaires "avant" et "après", pour le groupe LDW. Le tableau 8.8 synthétise les résultats de ces tests.

TABLEAU 8.8 – Résultats des tests appariés entre les questionnaires "avant" et "après".

Groupe	Utilité	Satisfaction
LDW	$Z = 2.17; p = 0.03$	$t(10) = -1.4; p = 0.19$
LKA	$Z = 0.3; p = 0.77$	$t(10) = -0.08; p = 0.93$

8.4.5 Tâche secondaire

La figure 8.10 présente les résultats de la tâche secondaire, pour chacun des groupes. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les groupes, ni sur le temps moyen de réponse ($H(2, 33) = 1.4; p = 0.5$), ni sur le nombre de bonnes réponses ($H(2, 33) = 2.14; p = 0.34$), ni sur le nombre de mauvaises réponses ($H(2, 33) = 0.67; p = 0.72$).

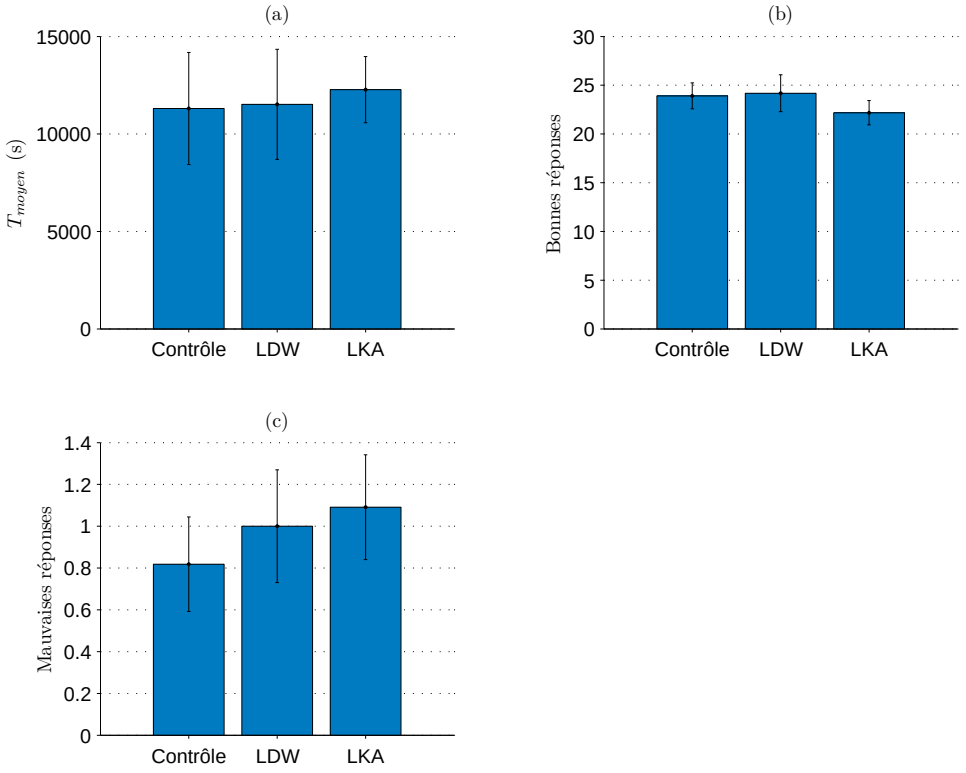


FIGURE 8.10 – Résultats de la tâche secondaire, pour chaque groupe : (a) temps moyen de réponse à une tâche, (b) nombre de bonnes réponses, (c) nombre de mauvaises réponses. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

8.5 Discussion

8.5.1 Conduite normale

Les résultats n'ont pas montré de différence significative dans le contrôle latéral avec système d'aide lors de la conduite en ligne droite. Lors de la conduite en courbe en revanche, les résultats ont montré une amélioration du contrôle latéral (*i.e.* une diminution significative de l'ICEL) avec le système LKA. Les résultats ne permettent par contre pas la même conclusion avec le système LDW. Le système LKA semble donc plus efficace que le système LDW.

Une analyse plus détaillée sur le contrôle latéral en courbe a permis de montrer que l'apport du LKA résidait principalement en une réduction de l'ICEL vers la gauche. Ce système a donc empêché les sujets de conduire trop vers l'extérieur du virage. Ce résultat confirme celui obtenu dans l'expérimentation présentée au chapitre précédent (voir 7.5.1). Le système LKA semble ainsi indiqué pour réduire, à plus grande vitesse, les risques de sous-virage.

8.5.2 Situation d'urgence

Lors de la situation d'urgence, un sujet conduisant avec le système LKA est rentré en collision avec le camion. Bien qu'un seul sujet ne suffise pas à rendre ce résultat significatif, il pourrait, comme lors de l'expérimentation présentée au chapitre précédent, suggérer une difficulté à réagir de façon adéquate avec le LKA.

Les indicateurs mesurés sur la situation d'urgence ont montré que les sujets du groupe LKA ont initié leur manœuvre à une distance du camion plus importante que les sujets du groupe LDW. En revanche, le *time-to-collision* montre la même tendance, mais de façon non significative, suggérant ainsi une atténuation de cet effet par la vitesse du véhicule (voir l'équation 7.1 définissant le *time-to-collision* dans cette situation).

Les analyses sur l'accélération latérale ont montré que l'accélération latérale maximale atteinte lors de l'évitement du camion n'était pas significativement différente de celle atteinte en prise de virage normale. En revanche, les sujets ont atteint ce pic d'accélération latérale à une vitesse significativement plus faible lors de l'évitement que lors de la prise de virage normale. Ces résultats diffèrent de ceux auxquels nous nous attendions. En effet, comme l'a montré l'expérimentation présentée au chapitre précédent (voir 7.5.2), cet évitement nécessitait une accélération plus importante que celle normalement atteinte en virage, d'autant plus pour cette expérimentation où la manœuvre à effectuer pour éviter l'obstacle était plus importante (le camion étant placé légèrement plus près du centre de la route que lors de l'expérimentation précédente). Les sujets ont néanmoins réussi, en adoptant une vitesse plus faible, à contrôler l'accélération latérale et à la maintenir dans un ordre de grandeur comparable à celui d'une prise de virage normale. Nous pensons donc que ce résultat confirme l'hypothèse de Reymond et al. (2001) selon laquelle les conducteurs régulent leur vitesse afin de limiter l'accélération latérale, en l'étendant à une

situation d'urgence.

Les résultats de l'analyse du contrôle latéral lors des différentes phases de la manœuvre d'évitement sont beaucoup plus mitigés. Les résultats observés lors de l'expérimentation précédente (voir 7.5.2) n'ont en effet pas été reproduits ici. Seuls les sujets du groupe LKA ont montré une corrélation entre la durée de leur coup de volant et l'angle de l'obstacle à la fin de celui-ci, ainsi qu'entre l'amplitude de leur contrebraquage et leur position latérale lors du retour sur la voie de droite.

8.5.3 Questionnaire

L'analyse des réponses au questionnaire a montré que le système LDW était évalué significativement plus utile après avoir été testé en conduite qu'avant. Ce résultat inattendu paraît en contradiction avec les résultats sur les données objectives qui n'ont pas montré de réelle efficacité du LDW. Mais, comme l'ont montré Ho et al. (2006) sur des systèmes d'alerte auditive et comme l'ont généralisé Navarro et al. (2010) sur plusieurs types de systèmes d'aide à la conduite, les évaluations subjectives d'un système ne reflètent pas forcément son efficacité réelle, mesurée à l'aide de méthodes objectives.

8.5.4 Tâche secondaire

Les indicateurs de performance mesurés sur la tâche secondaire n'ont montré aucune différence entre les différents groupes. Cela confirme, d'une part, que le niveau de distraction était comparable entre les groupes. D'autre part, cela montre que les systèmes d'aide au contrôle latéral étudiés n'ont pas augmenté la charge mentale des conducteurs, car dans ce cas, une dégradation des performances à la tâche secondaire aurait été observée (Sanders, 1979; de Waard, 1996).

8.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une expérimentation réalisée sur un simulateur de conduite à restitution de mouvements, au cours de laquelle les conducteurs ont utilisé des systèmes d'aide au contrôle latéral, afin d'étudier leur réaction en situation d'urgence en présence de ces systèmes. Deux systèmes d'aide, représentant deux différents niveaux d'automatisation, ont été utilisés. Les résultats nous ont montré tout d'abord l'efficacité du système LKA pour améliorer le contrôle latéral lors de la conduite en virage. Lors de la situation d'urgence, les sujets conduisant avec ou sans système d'aide ont de manière équivalente réussi à éviter l'obstacle.

Les analyses sur l'accélération latérale maximale lors de la manœuvre d'évitement de l'obstacle ont montré que les conducteurs ont réussi à réguler leur vitesse, afin de maintenir cette accéléra-

tion latérale dans des limites acceptables, c'est-à-dire équivalente à celle atteinte lors d'une prise de virage normale.

En revanche, les résultats présentés dans le chapitre précédent n'ont pas été reproduits ici. En effet, les résultats sur le contrôle latéral pendant la situation d'urgence sont mitigés, et ne confirment pas les conclusions tirées au chapitre précédent, qui montraient des différences dans la réaction au volant en fonction du système d'aide au contrôle latéral utilisé, et ce malgré une situation d'urgence plus critique que lors de l'expérimentation précédente.

Cependant, cette expérimentation ne remet pas pour autant en cause les conclusions du chapitre précédent. En effet, le simulateur utilisé ici était différent, introduisant notamment la restitution de mouvements, qui joue un rôle crucial dans le réalisme de la simulation et le comportement des conducteurs (Kemeny et Panerai, 2003). Ainsi, nous pensons que la majeure partie des différences observées dans les résultats en découle. Le prochain chapitre aura donc pour objectif de mettre en regard les deux expérimentations précédemment présentées, et de discuter de leurs résultats respectifs par rapport à la présence ou non de restitution de mouvements.

Chapitre 9

Influence de la restitution de mouvements

9.1 Introduction

Les expérimentations présentées dans les deux chapitres précédents ont été réalisées sur deux simulateurs différents : la première sur un simulateur statique (voir 4.3.1), et la deuxième sur un simulateur dynamique (voir 4.3.2). Ces deux expérimentations, quoique relativement proches et partageant le même protocole, ont montré des résultats relativement différents. Un des objectifs de cette thèse étant de discuter de la pertinence et de la validité des simulateurs de conduite pour le type d'études précédemment décrites, ce chapitre est donc consacré à la mise en parallèle des résultats des deux expérimentations. En effet, les deux simulateurs utilisés étaient très différents, principalement de part l'apport de la restitution de mouvement sur le simulateur dynamique. L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier l'influence qu'a eu la restitution de mouvements sur le comportement observé chez les conducteurs. Les résultats et leurs implications seront ainsi discutées de ce point de vue.

De nouvelles analyses ont pour cela été conduites, afin de comparer les données des deux expérimentations. Ici, l'accent à été mis sur le facteur "simulateur" plutôt que sur le facteur "système d'aide à la conduite", qui a déjà été traité dans les chapitres précédents.

9.2 Analyse de données

9.2.1 Conduite normale

L'intégrale curviligne de l'écart latéral (ICEL) calculée dans les chapitres précédents (voir 7.3.1), en ligne droite et en courbe, a été comparée entre les deux simulateurs, à l'aide de tests de Mann-Whitney.

9.2.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

Afin de comparer la réaction des sujets lors de la situation d'urgence, entre les deux expérimentations précédentes, les indicateurs suivants (voir 7.3.2) ont été comparés :

- Le *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, noté TTC_0.
- Le temps passé sur la voie de gauche pendant l'évitement, noté T_{gauche}.
- L'écart latéral maximum pendant l'évitement, noté $max(\epsilon)$, mesuré par rapport au centre de la voie de droite.
- La distance minimale à l'obstacle pendant l'évitement, notée $min(D_{obstacle})$.

Des tests de Student et de Mann-Whitney ont été réalisés afin d'évaluer les différences sur ces indicateurs entre les deux simulateurs.

Accélération latérale

Lors des deux expérimentations précédentes, l'accélération latérale maximale ainsi que la vitesse associée ont été mesurées sur la même portion de route, lors d'une prise de virage normale et lors de la situation d'urgence (voir 7.3.2). Afin d'évaluer l'influence de la restitution de mouvements sur ces valeurs, nous avons réalisé des tests de Mann-Whitney ainsi qu'une ANOVA à mesures répétées.

9.2.3 Questionnaire

Les réponses aux deux questionnaires, présentés avant et après la conduite avec système d'aide, ont été comparées entre les deux simulateurs. Pour cela, des tests de Student et de Mann Whitney ont été réalisés. Les systèmes étant identiques dans les deux expérimentations, aucune différence n'était attendue dans les réponses aux questionnaires. Cette analyse avait donc principalement

pour but de vérifier l'homogénéité des évaluations subjectives entre les deux simulateurs, et donc l'absence de biais.

9.2.4 Tâche secondaire

Des tests de Mann-Whitney ont été réalisés sur les données de la tâche secondaire (temps moyen de réponse à une tâche, nombre de bonnes réponses, nombre de mauvaises réponses), afin de comparer le niveau de performance entre les deux simulateurs. Comme l'analyse par groupe, celle-ci servaient principalement à vérifier que le niveau de distraction entre les deux expérimentations était comparable (voir 7.3.4).

9.3 Résultats

9.3.1 Conduite normale

La figure 9.1 présente les moyennes d'ICEL pour les simulateurs statique et dynamique.

On peut voir sur ces graphiques que l'ICEL est globalement plus faible sur le simulateur dynamique que sur le simulateur statique. Les analyses confirment cette tendance pour l'ICEL en ligne droite pendant la conduite de familiarisation ($U(27,33) = 297; Z = 2.21; p < 0.03$) mais pas pour les autres situations, à savoir, l'ICEL en ligne droite pendant la conduite de test ($U(27,33) = 326; Z = 1.78; p = 0.08$), l'ICEL en courbe pendant la conduite de familiarisation ($U(27,33) = 345; Z = 1.49; p = 0.14$) et l'ICEL en courbe pendant la conduite de test ($U(27,33) = 439; Z = 0.1; p = 0.92$).

9.3.2 Situation d'urgence

Indicateurs globaux

La figure 9.2 présente les moyennes, par simulateur, des différents indicateurs globaux de la situation d'urgence.

Les analyses prouvent que la réaction à la situation d'urgence sur simulateur dynamique, comparée à celle sur simulateur statique, montre une augmentation significative de TTC_0 ($U(27,32) = 28; Z = -6.15; p < 0.001$), une augmentation significative de T_{gauche} ($U(27,32) = 69, Z = -5.58; p < 0.001$), une augmentation significative de $max(\epsilon)$ ($t(57) = -5.53; p < 0.001$) et une diminution significative de $min(D_{obstacle})$ ($t(57) = 4.5; p < 0.001$).

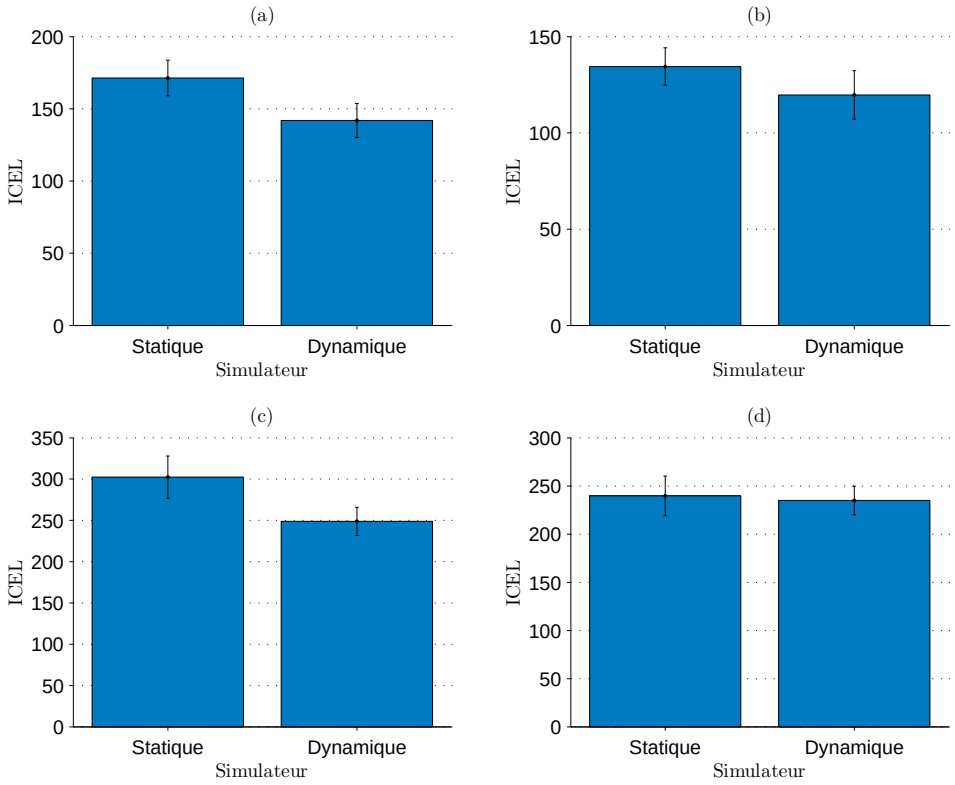


FIGURE 9.1 – Moyennes d'ICEL sur les deux simulateurs : (a) ICEL en ligne droite pendant la conduite de familiarisation ; (b) ICEL en ligne droite pendant la conduite de test ; (c) ICEL en courbe pendant la conduite de familiarisation ; (d) ICEL en courbe pendant la conduite de test. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

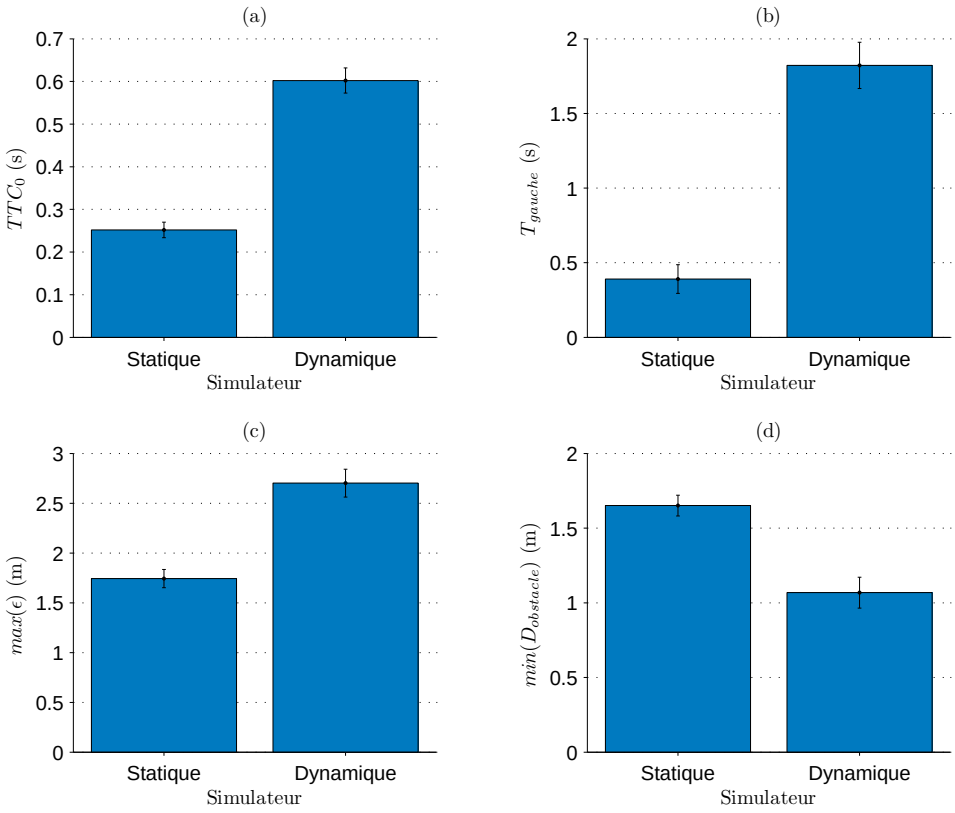


FIGURE 9.2 – Moyennes par simulateur : (a) *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement ; (b) temps passé sur la voie de gauche ; (c) écart latéral maximum ; (d) distance minimale à l'obstacle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Accélération latérale

La figure 9.3 présente les moyennes d'accélération latérale maximale, lors de la prise de virage normale et lors de la situation d'urgence, pour les deux simulateurs.

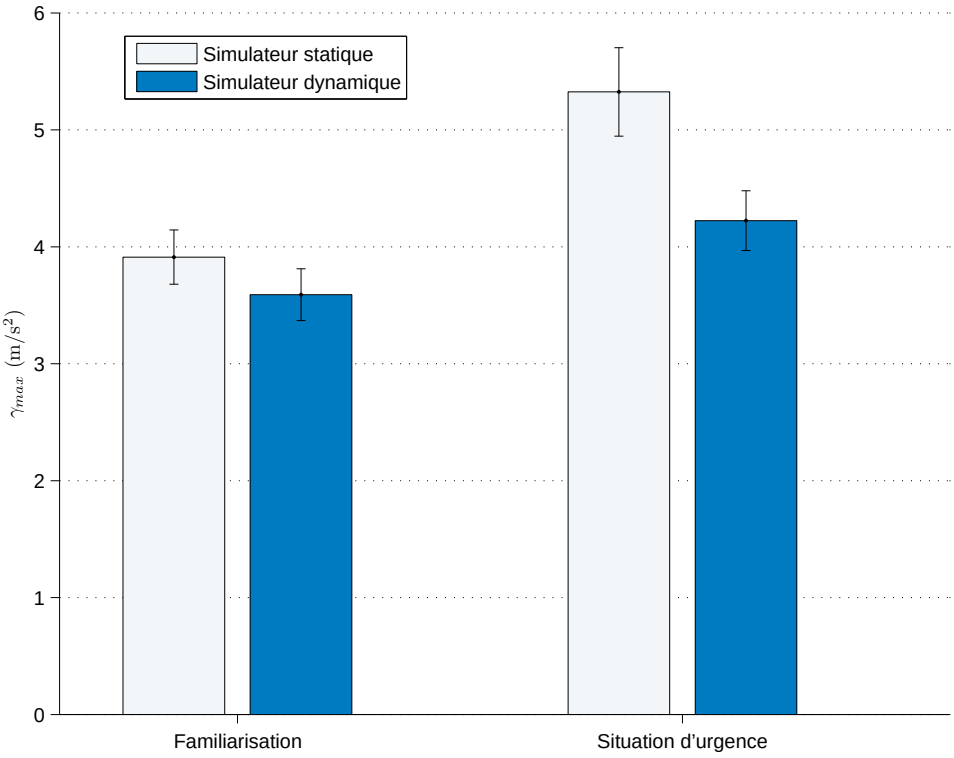


FIGURE 9.3 – Moyennes d'accélération latérale maximale γ_{max}, lors des deux conduites et sur les deux simulateurs. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les tests de Mann-Whitney réalisés sur l'accélération latérale maximale ne montrent aucune différence significative entre les deux simulateurs lors de la conduite de familiarisation ($U(27, 32) = 354; Z = -1.19; p = 0.24$), mais une accélération significativement plus grande sur simulateur statique que sur simulateur dynamique lors de la situation d'urgence ($U(27, 32) = 279; Z = -2.33; p < 0.02$).

La figure 9.4 présente les moyennes de vitesse associée à l'accélération latérale maximale, lors de la prise de virage normale et lors de la situation d'urgence, pour les deux simulateurs.

L'ANOVA à mesure répétées réalisée sur la vitesse associée montre un effet significatif du type de simulateur ($F(1, 57) = 13.39; p < 0.001$), un effet significatif du type de conduite ($F(1, 57) = 37.49; p < 0.001$), ainsi qu'un effet d'interaction entre ces deux facteurs ($F(1, 57) = 5.91; p < 0.02$) sur cet indicateur.

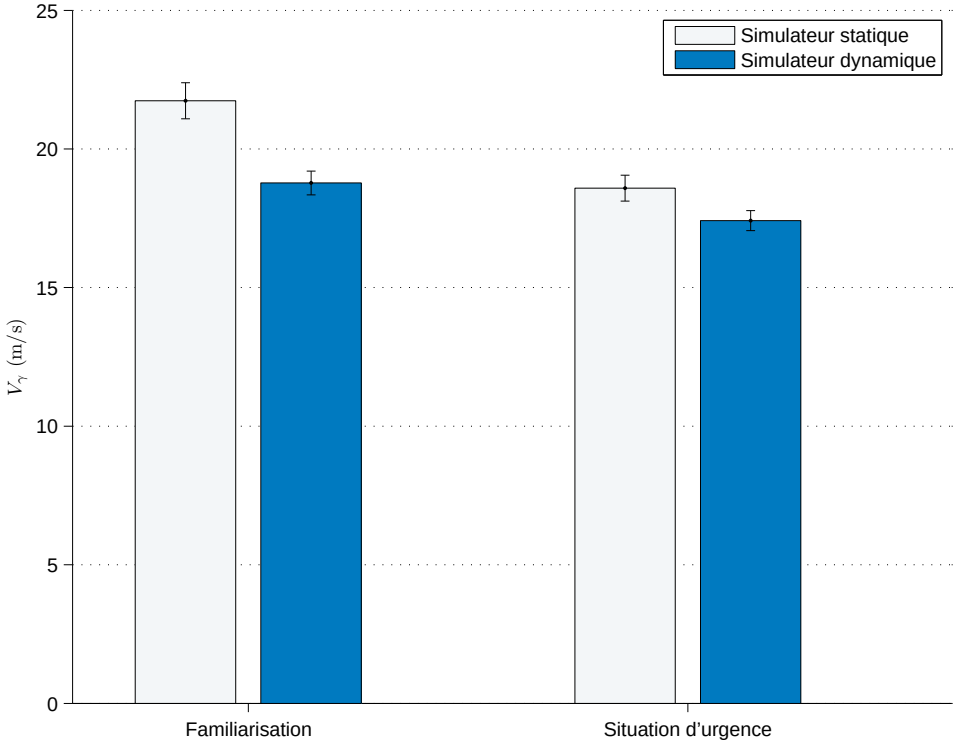


FIGURE 9.4 – Moyennes de vitesse associée à l'accélération latérale maximale V_γ, lors des deux conduites et sur les deux simulateurs. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

9.3.3 Questionnaire

La figure 9.5 présente les moyennes des scores d'utilité et de satisfaction, pour les deux questionnaires et pour les deux simulateurs.

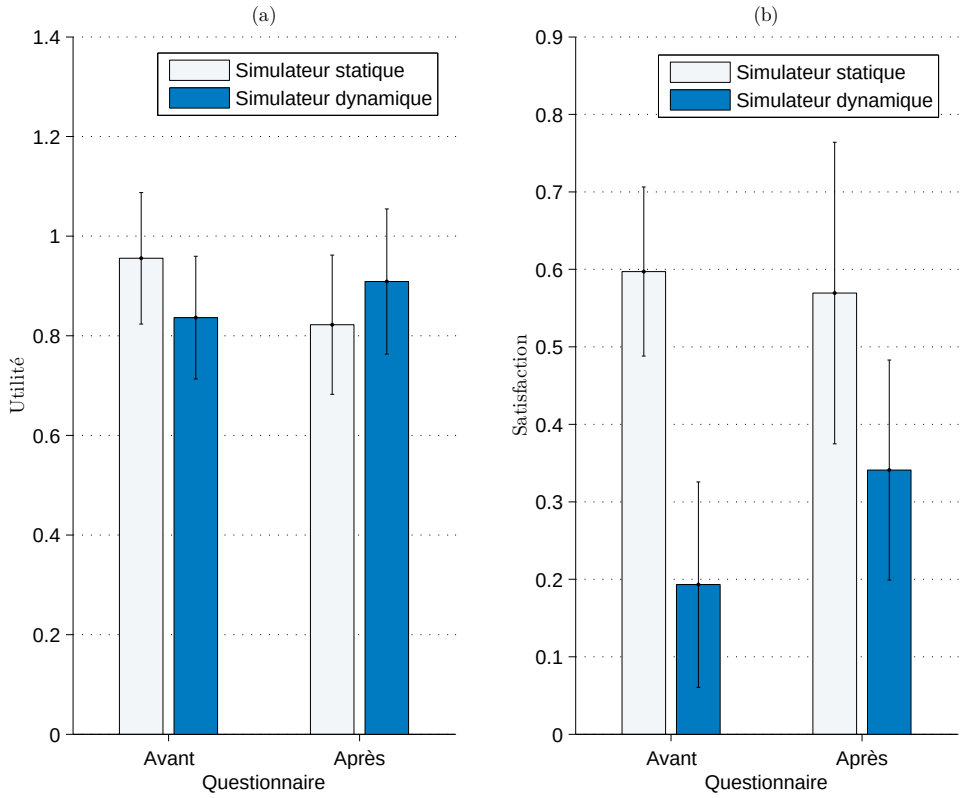


FIGURE 9.5 – Réponses aux questionnaires pour les deux simulateurs : (a) utilité ; (b) satisfaction. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Les analyses montrent, pour le questionnaire "avant", un score de satisfaction significativement plus élevé sur simulateur statique ($U = 118.5; Z = 2.16; p = 0.03$). En revanche, le score d'utilité ne montre pas de différence significative ($t(38) = 0.66; p = 0.51$). Il en va de même pour les scores du questionnaire "après" d'utilité ($t(38) = -0.42; p = 0.67$) et de satisfaction ($t(38) = 0.97; p = 0.34$).

9.3.4 Tâche secondaire

La figure 9.6 présente les résultats de la tâche secondaire, sur les deux simulateurs.

Les analyses ne montrent aucune différence significative entre les deux simulateurs que ce soit

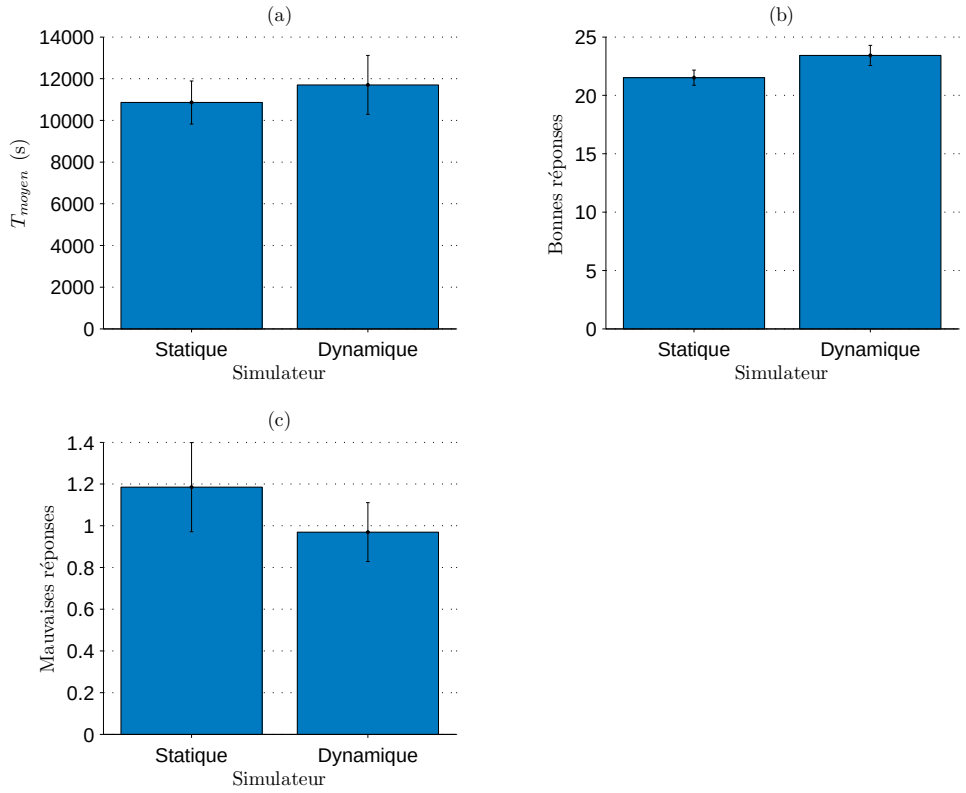


FIGURE 9.6 – Résultats de la tâche secondaire pour les deux simulateurs : (a) temps moyen de réponse à une tâche, (b) nombre de bonnes réponses, (c) nombre de mauvaises réponses. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

pour le temps moyen de réponses ($U = 443; Z = -0.04; p = 0.97$), le nombre de bonnes réponses ($U = 315; Z = -1.94; p = 0.05$), ou le nombre de mauvaises réponses ($U = 409.5; Z = 0.53; p = 0.59$).

9.4 Discussion

9.4.1 Conduite normale

Les données recueillies pendant les deux expérimentations ont montré une tendance générale à présenter des valeurs d'ICEL plus faible sur simulateur dynamique que sur simulateur statique (néanmoins cet écart n'était significatif que pour la conduite en ligne droite lors de la conduite de familiarisation). Cela montre que les conducteurs ont eu plus de facilité à maintenir leur position sur leur voie en présence de la restitution de mouvement. En effet, ces mouvements permettant aux conducteurs une meilleure perception de leurs déviations latérales (McLane et Wierwille, 1975), il leur était ainsi plus facile (avec notamment moins de délai) de corriger leur trajectoire en se replaçant au centre de la voie.

Des deux expérimentations, celle réalisée sur simulateur dynamique montre sur l'ICEL un apport moindre des système d'aide au contrôle latéral. En effet, lors de cette expérimentation, seule l'efficacité du LKA, qui présentait le niveau d'automatisation le plus élevé, a été prouvée. Lors de l'expérimentation sur simulateur statique en revanche, le LDW aussi bien que le LKA s'étaient montrés efficaces.

Comme montré précédemment, la conduite sur simulateur dynamique a montré chez les sujets un meilleur suivi de trajectoire dès la conduite de familiarisation, c'est-à-dire avant l'introduction de systèmes d'aide à la conduite. Etant donné ces résultats, nous pensons donc que l'amélioration du contrôle latéral introduite par l'ajout de restitution de mouvements tendrait à atténuer l'efficacité observée des systèmes d'aide au contrôle latéral.

9.4.2 Situation d'urgence

Sur les deux simulateurs, le taux d'accident lors de la situation d'urgence est resté très faible : un sujet de chaque expérimentation a eu un accident. Il s'agissait d'un sujet utilisant le LKA dans les deux cas. Cependant, ces cas isolés n'étaient pas suffisants pour avoir une augmentation significative du taux d'accident avec ce système d'aide.

Les circonstances de l'accident étaient différentes pour ces deux sujets. Le sujet de l'expérimentation statique a réussi à éviter le camion, mais a ensuite perdu le contrôle du véhicule en cherchant à revenir sur la voie de droite, puis est sorti de la route. Le sujet de l'expérimentation dynamique n'a en revanche pas réussi à éviter le camion, et est rentré en collision avec celui-ci. Dans

le premier cas, la cause est vraisemblablement une vitesse excessive, alors que le deuxième cas traduirait plutôt une réaction inappropriée, qu'elle ait été trop tardive ou bien trop faible.

Indicateurs globaux

Nous avons observé sur simulateur dynamique, par rapport au simulateur statique, une augmentation du *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, une augmentation du temps passé sur la voie de gauche, une augmentation de l'écart latéral maximum et une diminution de la distance minimale à l'obstacle, par rapport à l'expérimentation sur simulateur statique.

Ces phénomènes ne sont cependant pas à mettre uniquement sur le compte de la différence entre les deux simulateurs. En effet, pour l'expérimentation sur simulateur dynamique, la situation d'urgence a été modifiée (voir 8.2.3) : le camion à éviter était situé plus près du centre de la route. Ces résultats confirment donc le caractère plus critique de cette situation d'urgence, qui imposait alors une manœuvre d'évitement plus ample, ainsi qu'une marge de sécurité réduite. Concernant l'augmentation du *time-to-collision* au début de la manœuvre d'évitement, elle s'explique vraisemblablement par le fait que, le camion étant masqué par une rangée d'arbre mais plus proche du centre de la route, les sujets ont pu le voir légèrement plus tôt que lors de l'expérimentation sur simulateur statique.

Décomposition de la manœuvre d'évitement

Lors des deux expérimentations, les manœuvres d'évitement effectuées par les sujets présentent les même caractéristiques. En ce qui concerne le contrôle latéral, elles peuvent être décomposées selon la même séquence : tout d'abord un coup de volant rapide vers la gauche, puis un contrebraquage pour revenir vers la voie de droite, puis une stabilisation autour de la position centrale du volant afin de continuer la conduite. Seuls quelques sujets de l'expérimentation sur simulateur dynamique ont montré une courte stabilisation lors du pic d'angle volant vers la gauche, avant de contrebraquer. Ce comportement découle vraisemblablement de la modification de la situation d'urgence et avait pour but d'effectuer un écart vers la voie de gauche de plus grande amplitude.

En revanche, les premières tendances observées sur le comportement au volant lors des différentes phases identifiées de la manœuvre d'évitement, n'ont pas été confirmées sur simulateur dynamique. En effet, les relations liant les estimateurs de la criticité de la situation à différents instants avec la réponse au volant des conducteurs, observées sur les données de l'expérimentation statique, n'étaient pas significatives sur les données de l'expérimentation dynamique. Nous pensons que cela signifie que sur simulateur statique, les sujets ont principalement utilisé des indices visuels (tels que l'angle de l'obstacle ou le *time-to-line-crossing*, utilisés lors de ces analyses par phase) et ont réagi principalement à l'aide du volant, alors que sur simulateur dynamique, les sujets ont également utilisé des indices vestibulaires, et le contrôle longitudinal a joué un rôle important dans la réussite de l'évitement. En particulier, nous pensons que les accélérations la-

térales perçues par les conducteurs leur ont permis d'adapter leur vitesse (Reymond et al., 2001; Correia Grácio et al., 2011). De ce fait, l'importance relative du contrôle latéral dans l'évitement de l'obstacle s'est trouvée diminuée.

Accélération latérale

Les analyses décrites dans les deux chapitres précédents ont cherché à évaluer l'évolution de l'accélération latérale maximale, ainsi que de la vitesse associée, pendant la manœuvre d'évitement d'obstacle, par rapport à une prise de virage normale. Les résultats ont montré une augmentation de l'accélération latérale maximale uniquement sur le simulateur statique, mais une diminution de la vitesse associée sur les deux simulateurs.

Dans ce chapitre, la comparaison des données issues des deux expérimentations a montré, lors de la situation d'urgence, une accélération latérale maximale significativement plus grande sur simulateur statique que sur simulateur dynamique.

La vitesse associée à cette accélération latérale maximale était significativement plus faible pendant la situation d'urgence que pendant la conduite normale, et également significativement plus importante sur simulateur statique que sur simulateur dynamique. De plus, un effet significatif d'interaction suggère que la réduction de vitesse appliquée lors de la situation d'urgence était plus importante sur simulateur statique que sur simulateur dynamique.

Ces résultats vont à l'encontre de ce que nous avions prédit car, la situation d'urgence étant légèrement plus critique lors de l'expérimentation sur simulateur dynamique (voir 8.2.3), la manœuvre à réaliser pour éviter le camion était de plus grande amplitude. Il était alors attendu que l'accélération latérale lors de l'évitement serait plus importante sur simulateur dynamique. Or, le contraire a été observé.

Néanmoins, cette observation étend l'hypothèse de Reymond et al. (2001) à une situation d'urgence. En effet, selon les auteurs, l'accélération latérale est un indice primordial utilisé par les conducteurs lors de la prise de virage, et contrôlé grâce à une réduction de la vitesse. Nos résultats montrent que ce phénomène est également observable lors d'une situation d'urgence modérée. En effet, les conducteurs ont réussi, sur simulateur dynamique, à limiter l'accélération latérale maximale à celle atteinte lors d'une prise de virage normale, en réduisant leur vitesse. En revanche, sur simulateur statique et malgré une réduction de leur vitesse plus importante, les conducteurs ont atteint une accélération latérale maximale largement supérieure à celle observée lors d'une prise de virage normale.

L'accélération latérale apparaît donc comme une information primordiale pour une telle manœuvre d'urgence, mais dont la perception basée uniquement sur des indices visuels semble assez mauvaise (Correia Grácio et al., 2011). Nous pensons donc qu'en l'absence d'une perception correcte de l'accélération latérale comme cela est le cas sur simulateur statique, les sujets ont réagi de manière exagérée, produisant ainsi une accélération latérale plus grande que celle qu'ils

produiraient dans la réalité.

9.4.3 Questionnaire

Les analyses des deux chapitres précédents ont montré, sur simulateur statique, que les sujets ont donné un score d'utilité significativement plus élevé au système LDW qu'au système LKA, après l'avoir testé en conduite. Sur simulateur dynamique, ce résultat n'a pas été retrouvé. En revanche, les sujets utilisant le LDW ont significativement augmenté leur score d'utilité entre les deux questionnaires, ce qui n'était pas le cas des sujets utilisant le LKA.

Conformément aux résultats attendus, les réponses aux questionnaires montrent très peu de différences entre les deux simulateurs, les systèmes d'aide utilisés dans les deux cas étant identiques. Cela montre pour le questionnaire présenté après la conduite que les sujets ont réussi, comme il leur était demandé, à évaluer le système d'aide en lui-même, en faisant abstraction des performances et du niveau de réalisme du simulateur.

Seul le score de satisfaction, avant la conduite avec système d'aide, se montre plus élevé sur simulateur statique. Cette différence pourrait traduire une certaine appréhension des sujets quant à l'utilisation d'un système d'aide sur le simulateur dynamique. En effet, la conduite étant plus complexe et plus réaliste que sur un simulateur statique, elle demande également plus d'attention. Les sujets pourraient alors avoir craint que cela ne les perturbe et altère donc leur performance de conduite. En effet, même si cette appréhension ne se retrouve pas dans le questionnaire à la fin de la conduite, plusieurs sujets ont reporté avoir apprécié l'expérience mais être sceptique sur l'utilisation d'un tel système dans un véhicule réel.

9.4.4 Tâche secondaire

Tout comme l'ont montré les analyses par groupe, celles réalisées ici par simulateur n'ont montré aucune différence significative sur les performances à la tâche secondaire. Le niveau de distraction induit par la tâche secondaire semble donc avoir été équivalent, quel que soit le système d'aide et quel que soit le simulateur. La restitution de mouvements, aussi bien que les systèmes d'aide, semble donc n'avoir eu aucun impact sur la charge mentale des conducteurs (Sanders, 1979; de Waard, 1996).

9.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en parallèle les résultats des deux expérimentations présentées dans les chapitres précédents, afin de discuter des apports de la restitution de mouvement pour ce type d'études.

Les analyses ont montré que les conducteurs adoptaient un meilleur contrôle latéral sur simulateur dynamique, en conduisant plus près du centre de la voie. Par conséquent, les bénéfices d'un système d'aide au contrôle latéral se trouvent ainsi atténués. L'expérimentation sur simulateur dynamique n'a en effet montré une réelle efficacité que pour le système d'aide possédant le niveau d'automatisation le plus élevé. Ces résultats incitent donc, pour les études à venir, à être particulièrement prudent vis à vis des observations réalisées sur un simulateur à faible niveau de réalisme, notamment un simulateur statique.

L'analyse de la manœuvre d'évitement lors des deux expérimentations a confirmé le caractère plus critique de la situation d'urgence modifiée lors de l'expérimentation dynamique. En effet, les sujets sur simulateur dynamique ont effectué une manœuvre d'évitement plus large. Cependant, ils ont aussi bien réussi que les sujets de l'expérimentation statique à garder le contrôle du véhicule.

Les résultats montrent que lors de l'expérimentation sur simulateur statique, les sujets ont eu une mauvaise perception de l'accélération latérale. Ils ont alors effectué un dépassement brutal en atteignant des niveaux d'accélération latérale élevés. En revanche, les sujets de l'expérimentation sur simulateur dynamique ont réussi à maintenir leur accélération latérale au même niveau que lors d'une prise de virage, grâce à une réduction de leur vitesse, permettant ainsi un évitement plus souple et confortable.

Ces résultats mettent en relief l'importance de la restitution de mouvement pour étudier le comportement des conducteurs dans ce type de situation d'urgence, et incite à prendre les résultats observés en l'absence de mouvement avec beaucoup de précaution. Des études sur véhicules réels seraient également nécessaires afin de valider les comportements observés sur simulateur dynamique.

Quatrième partie

Conclusion générale et bibliographie

Chapitre 10

Conclusion générale

10.1 Synthèse des résultats

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux phénomènes complexes d'adaptation des conducteurs aux systèmes d'aide à la conduite. En effet, la littérature nous a appris que l'effet recherché par de tels système n'était pas toujours observé, et que certains effets négatifs pouvaient même parfois apparaître. En particulier, l'accent a été mis sur les situations critiques et d'urgence, sortant du domaine de validité des systèmes d'aide, pouvant mettre en lumière des effets négatifs, en terme de sécurité, de l'adaptation des conducteurs. Comme nous l'avons vu, la simulation de conduite offre la possibilité d'observer les conducteurs dans de telles situations, tout en garantissant leur sécurité. Cependant, il convient pour cela d'étudier avant tout l'outil de simulation, et sa capacité à reproduire de tels phénomènes.

Nous nous sommes donc demandé, à travers cette étude, si les simulateurs de conduite permettaient d'observer l'adaptation des conducteurs, et en particulier s'ils permettaient d'en dégager d'éventuels effets négatifs. Nous avons également étudié plus en détails la réaction des conducteurs en situation d'urgence, en cherchant une éventuelle influence des systèmes d'aide à la conduite sur cette réaction. Enfin, nous nous sommes questionnés sur la pertinence des simulateurs de conduite pour de telles situations, et en particulier sur l'intérêt de la restitution de mouvements.

Dans cette optique, trois expérimentations ont été réalisées sur des simulateurs de conduite, et en présence de différents systèmes d'aide à la conduite.

Une première expérimentation, réalisée avec un système Forward Collision Warning, a permis d'observer une adaptation des conducteurs. En effet, cette étude a montré les effets bénéfiques d'une part du système d'aide, et d'autre part d'une phase de familiarisation des conducteurs avec le système. Les conducteurs familiarisés ont montré une modification de leur comportement, dans le sens d'une conduite plus sûre, et de plus d'anticipation. Un effet négatif a néanmoins

été soulevé : les conducteurs utilisant le FCW avaient tendance à se déporter trop tôt lors d'une manœuvre de dépassement, ayant ainsi moins de temps pour observer leur environnement.

Une deuxième expérimentation a été réalisée sur un simulateur statique avec un système Lane Departure Warning et un système Lane Keeping Assistant. Elle a montré tout d'abord une amélioration du contrôle latéral des conducteurs en présence de ces systèmes. L'étude a porté plus spécifiquement sur une manœuvre d'urgence : l'évitement d'un obstacle inattendu. Nous avons observé une réaction appropriée des conducteurs et un évitement réussi, que ce soit avec ou sans système d'aide. Néanmoins, une analyse plus fine de la réaction, principalement en terme de contrôle latéral, a suggéré un effet d'adaptation, pouvant mener à des difficultés de contrôle du véhicule dans des situations plus critiques, en particulier dans le cas d'un système d'aide présentant un niveau d'automatisation élevé, comme le LKA.

Une troisième expérimentation a reproduit cette situation d'urgence, en augmentant son niveau de criticité, sur un simulateur dynamique. Les conducteurs ont cette fois-ci également démontré une réaction adéquate et un évitement de l'obstacle réussi.

Une mise en parallèle de ces deux dernières expérimentations a permis de dégager des différences fondamentales entre le comportement des conducteurs sur simulateur statique et sur simulateur dynamique. Premièrement, les conducteurs sur simulateur dynamique ont montré un contrôle latéral plus performant, atténuant ainsi les bénéfices observés des systèmes d'aide. Deuxièmement, la manœuvre d'évitement s'est avérée plus souple sur simulateur dynamique, grâce à une meilleure perception de l'accélération latérale ayant permis aux conducteurs d'adapter leur vitesse et de conserver le contrôle du véhicule.

10.2 Perspectives

Au regard de ces résultats, un premier constat s'impose quant à l'importance de la restitution de mouvements. En effet, la simulation statique s'est avérée efficace pour observer un effet d'adaptation à un système d'aide à la conduite et le comportement général des conducteurs lors de situations d'urgence. En revanche, l'analyse plus fine du comportement de conduite s'est trouvée plus fortement impactée par l'absence de mouvement, et les conclusions suggérées par les résultats obtenus sur simulateur statique n'ont pas été confirmées sur simulateur dynamique. Les comportements observés en l'absence de mouvement se doivent donc d'être interprétés avec prudence.

Dans le cas plus particulier de la manœuvre d'évitement d'obstacle, l'accélération latérale s'est avéré être une information primordiale utilisée par les conducteurs pour le contrôle du véhicule. La mauvaise perception de cette accélération sur un simulateur statique a en effet entraîné une réaction trop brusque des conducteurs, atteignant des niveaux d'accélération latérale au-delà de leur tolérance. En revanche, sur simulateur dynamique, les conducteurs ont bénéficié d'une perception plus fine de l'accélération latérale pour la maintenir dans une enveloppe acceptable,

en terme de sécurité et de confort. En outre, nous pensons que la restitution de ces accélérations joue un rôle prépondérant dans la perception du risque.

Les simulateurs statiques sont des outils efficaces pour les études d'ergonomie, ainsi que pour l'évaluation subjective de systèmes d'aide à la conduite. En revanche, nous pensons donc que la simulation dynamique est indispensable pour l'analyse fine du comportement des conducteurs, et pour l'observation d'une réaction réaliste en situation d'urgence.

Pour aller plus loin dans cette discussion, une comparaison entre simulation et conduite réelle serait intéressante. En effet, nous avons vu qu'une stimulation sensorielle plus complète, via l'ajout de restitution inertielle, engendrait un comportement de conduite et en particulier une réaction d'urgence plus réalistes. En revanche, la validité physique n'étant pas toujours atteinte, il conviendrait d'évaluer précisément la validité comportementale en découlant, en comparant ces comportements avec ceux obtenus sur un véhicule instrumenté. L'apport de la restitution de mouvements pourrait ainsi être mesuré, ainsi que celui de développements futurs des simulateurs de conduite allant dans le sens d'une amélioration de l'immersion sensorielle.

En particulier, nous pensons que les futurs développements portant sur la restitution de mouvements pourraient bénéficier à l'étude du comportement des conducteurs en situation d'urgence. L'augmentation de l'amplitude de déplacement des simulateurs, la réduction du temps de réponse, ou l'ajout de restitution vibratoire sont autant de pistes qui amélioreraient encore le réalisme de la simulation, et donc la validité des comportements observés.

Bibliographie

Abe, G., Itoh, M., et Tanaka, K. (2002). Dynamics of drivers' trust in warning systems. Dans *15th IFAC World Congress*. Published : Conference proceeding.

Abe, G. et 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 7*, 307–322.

Abe, G. et Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics 37*(5), 577–586.

Allen, T. M., Lumenfeld, H., et Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Record 366*, 102–115.

Artz, B., Cathey, L., Grant, P., Houston, D., et Greenberg, J. (2001). The design and construction of the visual subsystem for VIRTTEX, the driving simulator at the Ford research laboratories. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 255–262.

Auberlet, J., Pacaux, M., Anceaux, F., Plainchault, P., et Rosey, F. (2010). The impact of perceptual treatments on lateral control : A study using fixed-base and motion-base driving simulators. *Accident Analysis & Prevention 42*(1), 166–173.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica 19*(6), 775–779.

Barthou, A. (2011). *Confiance et reliance envers les systèmes en fonction de leur apparence physique*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

Bear, M. F., Connors, B. W., et Paradiso, M. A. (2007). *Neurosciences : A la découverte du cerveau*. Pradel, traduit par A. Nieoullon.

Ben-Yaacov, A., Maltz, M., et Shinar, D. (2002). Effects of an in-vehicle collision avoidance warning system on short- and long-term driving performance. *Human Factors 44*(2), 335–342.

Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris : Odile Jacob.

Berthoz, A., Pavard, B., et Young, L. R. (1975). Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) : Basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental Brain Research 23*(5), 471–489.

Bertollini, G. P. et Hogan, R. M. (1999). Applying driving simulation to quantify steering effort preference as a function of vehicle speed. *SAE Technical Paper 1999-01-0394*.

Bishop, R. (2005). *Intelligent Vehicle Technology And Trends*. Artech House Publishers.

Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car : A validation study. *Human Factors 24*(4), 473–486.

Blana, E. et Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors 44*, 303–313.

Bliss, J. P. et Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles : how collision alarm reliability affects driving. *Applied Ergonomics 34*(6), 499–509.

Boer, E. R. (2005). Driver performance assessment with a car following model. Dans *PROCEEDINGS of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.

Boer, E. R., Yamamura, T., Kuge, N., et Girshick, A. (2000). Experiencing the same road twice : A driver comparison between simulation and reality. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 33–55.

Breidenbach, C. et Tomaske, W. (2004). The use of driving simulators in simulating the off-road drive of wheeled vehicles. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 333–341.

Brünger-Koch, M., Briest, S., et Vollrath, M. (2006). Virtual driving with different motion characteristics - braking manoeuvre analysis and validation. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 69–78.

Cahour, B. et Forzy, J.-F. (2009). Does projection into use improve trust and exploration ? an example with a cruise control system. *Safety Science 47*(9), 1260–1270.

Carsten, O. (2002). Multiple perspectives. Dans R. Fuller et J. A. Santos (Eds.), *Human factors for highway engineers*, 11–21. Pergamon.

Cavallo, V. (1999). Speed and environmental characteristics in time-to-collision estimates and braking initiation. Dans A. G. Gale, I. D. Brown, C. M. Haslegrave, et S. P. Taylor (Eds.), *Vision in vehicles VIII*. Amsterdam : Elsevier.

Cavallo, V. et Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception 17*(5), 623–632.

Cavallo, V., Mestre, D., et Berthelon, C. (1997). Time-to-collision judgements : visual and spatio-temporal factors. Dans T. Rothengatter et E. C. Vaya (Eds.), *Traffic & Transport Psychology : Theory and Application*. Pergamon.

Chandler, R., Herman, R., et Montroll, E. (1958). Traffic dynamics : studies in car following. *Operational Research 6*(2), 164–184.

Clarke, A. H., Clarke, M. C., et Scherer, H. (1996). The influence of vestibular disorder on driving behaviour. Dans A. G. Gale, I. D. Brown, C. M. Haslegrave, et S. P. Taylor (Eds.), *Vision in vehicles, vol. V*. Amsterdam : Elsevier.

Coates, N., Ehrette, M., Hayes, T., Blackham, G., Heidet, A., et Kemeny, A. (2002). Head-mounted display in driving simulation applications in CARDS. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 33–43.

Cobb, S. V. G., Nichols, S., Ramsey, A., et Wilson, J. R. (1999). Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE). *Presence 8*(2), 169–186.

Colombet, F., Paillot, D., Mérienne, F., et Kemeny, A. (2010). Impact of geometric field of view on speed perception. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 69–79.

Comte, S. L. (2000). New systems : new behaviour ? *Transportation Research Part F 3*, 95–111.

Correia Grácio, B. J., Wentink, M., Pais, A. R. V., van Paassen, M. M., et Mulder, M. (2011). Driver behavior comparison between static and dynamic simulation for advanced driving maneuvers. *Presence 20*(2), 143–161.

Curry, R., Artz, B., Cathey, L., Grant, P., et Greenberg, J. (2002). Kennedy SSQ results : fixed- vs. motion-base Ford simulators. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 289–299.

Dagdelen, M. (2005). *Restitution des stimuli intertiels en simulation de conduite.* Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris.

Dagdelen, M., Berlioux, J.-C., Panerai, F., Reymond, G., et Kemeny, A. (2006). Validation process of the ultimate high-performance driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 37–47.

de Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' mental workload.* Thèse de doctorat, University of Groningen.

Deborne, R. (2009). *Modélisation de l'adaptation des conducteurs au comportement du véhicule et expérimentations sur simulateur.* Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.

Deborne, R., Barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., et Kemeny, A. (2008). Simulation study of driver stress and performance to an unexpected event. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 111–120.

Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., et Kemeny, A. (2011). Drivers' perception of loss of adherence in bends : Influence of motion rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering 11*, 041004.

Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering control. *Human Factors 20*(6), 691–707.

Endsley, M. R. (1987). The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Volume 31, 1388–1392.

Endsley, M. R. et Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics 42*(3), 462–192.

Endsley, M. R. et Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors 37*(2), 381–394.

Espié, S., Gauriat, P., et Duraz, M. (2005). Driving simulators validation : the issue of transferability of results acquired on simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference North America*, 149–156.

Essma, S. (2000). Steering effort analysis of an oval racing track setup champ car. Dans *International ADAMS User Conference*.

Evans, L. (2004). *Traffic Safety*. Science Serving Society.

Fajen, B. R. et Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstable avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance 29*(2), 343–362.

Feenstra, P., Wentink, M., Correia Grácio, B., et Bles, W. (2009). Effect of simulator motion space on realism in the Desdemona simulator. Dans *Proccedings of Driving Simulation Conference*, 133–144.

Filliard, N., Icart, E., Martinez, J.-L., Gérin, S., Mérienne, F., et Kemeny, A. (2010). Software assembly and open standards for driving simulation. Dans *Proccedings of Driving Simulation Conference*, 99–108.

Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.-M., et Coquillart, S. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle Volume 2 - L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*. Presse de l'école des Mines.

Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche Transports Sécurité 66*, 47–57.

Fuller, R. (2011). Driver control theory : From task difficulty homeostasis to risk allostasis. Dans B. E. Porter (Ed.), *Handbook of Traffic Psychology*. Academic Press.

Fuller, R. et Santos, J. A. (2002). Psychology and the highway engineer. Dans R. Fuller et J. A. Santos (Eds.), *Human factors for highway engineers*, 1–10. Pergamon.

Galante, F., Mauriello, F., Montella, A., Pernetti, M., Aria, M., et D'Ambrosio, A. (2010). Traffic calming along rural highways crossing small urban communities : Driving simulator experiment. *Accident Analysis & Prevention 42*(6), 1585–1594.

Gazis, D., Herman, R., et Potts, R. (1959). Car following theory of steady state traffic flow. *Operational Research 7*(4), 499–505.

General Motors Corporation (2005). Automotive collision avoidance system field operational test : Final program report. *Washington, DC : NHTSA*.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. et Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology 51*(3), 453–471.

Godley, S. T., Triggs, T. J., et Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention 34*(5), 589 – 600.

Godthelp, H. (1986). Vehicle control during curve driving. *Human Factors 28*(2), 211–221.

Godthelp, H., Milgram, P., et Blaauw, G. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors 26*(3), 257–268.

Grabe, V., Pretto, P., Giordano, P. R., et Bülthoff, H. H. (2010). Influence of display type on drivers' performance in a motion-based driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 81–88.

Greenberg, J., Curry, R., Blommer, M., Kozak, K., Artz, B., Cathey, L., et Kao, B. (2006). The validity of last-second braking and steering judgments in advanced driving simulators. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 143–153.

Guzek, M., Jurecki, R., Lozia, Z., et Stańczyk, T. L. (2006). Comparative analysis of driver behaviour on the track and in virtual environment. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 221–232.

Haines, A. (2011). The carrs-q advanced driving simulator. Dans *Road Safety Forum 2011 : Directions in Road Safety Research*.

Halata, Z. et Baumann, K. I. (2008). Anatomy of receptors. Dans M. Grunwald (Ed.), *Human Haptic Perception : Basics and Applications*. Basel : Birkhäuser Verlag.

Hayward, J. C. (1972). Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Record 384*, 24–34.

Heilig, M. L. (1962). Sensorama simulator. *US Patent N° 3 050 870*.

Ho, A. W. L., Cummings, M. L., Wang, E., Tijerina, L., et Kochhar, D. S. (2006). Integrating intelligent driver warning systems : effects of multiple alarms and distraction on driver performance. Dans *Proceedings of the Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, Washington DC.

Hoc, J., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, E., Netto, M., et Blosseville, J. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety : delegation and mutual control. *Le Travail Humain 2*, 153–182.

Hoc, J., Young, M. S., et Blosseville, J. (2009). Cooperation between drivers and automation : implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science 10*(2), 135–160.

Hoc, J.-M. (2001). Towards ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science 2*(3), 278–288.

Hoc, J.-M. et Blosseville, J.-M. (2003). Cooperation between drivers and in-car automatic driving assistance. Dans G. C. van der Veer et J. F. Hoorn (Eds.), *Proceedings of CSAPC'03*, 17–22. Rocquencourt : EACE.

Hoedemaeker, M. et Brookhuis, K. A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (acc). *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour 1*(2), 95–106.

Hollnagel, E. (2006). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design. *Cognition, Technology & Work 8*(3), 169–173.

Horswill, M. S. et McKenna, F. P. (1999). The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behavior : drivers' speed choice. *Journal of Applied Psychology 84*(6), 977–985.

Ivancic, K. et Hesketh, B. (2000). Learning from errors in a driving simulation : effects on driving skill and self-confidence. *Ergonomics 43*(12), 1966–1984.

Jamson, H. et Smith, P. (2002). How real does it feel ? an "emotional" validation of the Leeds driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 271–278.

Jamson, H. et Smith, P. (2003). Are you used to it yet ? braking performance and adaptation in a fixed-base driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference North America*.

Kaber, D. B. et Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress 16*(3), 126–131.

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

Kantowitz, B. H. (2000). In-vehicle information systems : Premises, promises, and pitfalls. *Transportation Human Factors 2*(4), 359–379.

Kaptein, N. A., Theeuwes, J., et Vand Der Horst, R. (1996). Driving simulator validity : Some considerations. *Transportation Research Record 1550*, 30–36.

Kemeny, A. et Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences 7*(1), 31–37.

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., et Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire : An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology 3*(3), 203–220.

Kircher, K. (2007). Driver distraction - a review of the literature. *VTI report 549A*.

Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2010). Familiarization with critical situations when using a forward collision warning : effects on driver-system interactions. Dans *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 37–47.

Koustanaï, A., Mas, A., Cavallo, V., et Delhomme, P. (2010). Familiarization with a forward collision warning on driving simulator : cost and benefice on driver-system interactions and trust. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 169–179.

Land, M. F. et Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature 369*, 742–744.

LeBlanc, D., Eby, D. W., Bareket, Z., et Vivoda, J. M. (2008). On-road evaluation of the save-it vehicle prototype. *Task 14C Final Report for the SAfety VEhicles using adaptive Interface Technology (SAVE-IT) Project*.

Lechner, D. et Malaterre, G. (1991). Emergency manuever experimentation using a driving simulator. *Autotechnologies Conference, SAE Technical Paper 910016*.

Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception 5*, 437–459.

Lee, J. D. (2009). Can technology get your eyes back on the road ? *Science 324*(5925), 344–346.

Lee, J. D. et See, K. A. (2004). Trust in automation : Designing for appropriate reliance. *Human Factors 46*(1), 50–80.

Lee, J. D., Young, K. L., et Regan, M. A. (2009). Defining driver distraction. Dans M. A. Regan, J. D. Lee, et K. L. Young (Eds.), *Driver distraction : Theory, Effects and Mitigation*, 31–40. CRC Press.

Lee, W. S., Sung, D. H., Lee, J. Y., Kim, Y. S., et Cho, J. H. (2007). Driving simulation for evaluation of driver assistance systems and driving management systems. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference North America*, 153–161.

Lehto, M. R. (1991). A proposed conceptual model of human behavior and its implications for design of warnings. *Perceptual and Motor Skills 73*(2), 595–611.

Leonard, J. J. et Wierwille, W. W. (1975). Human performance validation of simulators : Theory and experimental verification. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Volume 19, 446–456.

Leutzbach, W. et Wiedemann, R. (1986). Development and application of traffic simulation models at Karlsruhe Institut für Verkehrwesen. *Traffic Engineering and Control 27*(5), 270–278.

Lewis-Evans, B. et Rothengatter, T. (2009). Task difficulty, risk, effort and comfort in a simulated driving task—Implications for risk allostasis theory. *Accident Analysis & Prevention 41*, 1053–1063.

Liu, A. et Chang, S. (1995). Force feedback in a stationary driving simulator. Dans *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Volume 2, 1711–1716.

Lo, W. T. et So, R. H. Y. (2001). Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Applied Ergonomics 32*, 1–14.

Lumelsky, V. J. (1985). On fast computation of distance between line segments. *Information Processing Letters 21*, 55–61.

Malaterre, G. (1987). *Les activités sous contrainte de temps : le cas des manœuvres d'urgence en conduite automobile.* Thèse de doctorat, Université Paris V René Descartes.

Malaterre, G. et Fréchaux, J. (2001). Etude de la validité des simulateurs de conduite par comparaison de tâches réalisées en situation réelle et en simulation. Dans *Actes INRETS, Facteurs perceptifs dans les activités de transport.*

Marberger, C. (2008). Absolute and perceived validity of the Fraunhofer IAO immersive driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 195–203.

Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision 8*(11), 1–11.

Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in Transportation Studies RSS2011 Special Issue*, 149–158.

Mattes, S. (2003). The lane change task as a tool for driver distraction evaluation. Dans *IHRA-ITS Workshop on Driving Simulator Scenarios*, Dearborn, Michigan.

Mattes, S. et Hallén, A. (2009). Surrogate distraction measurement techniques : the lane change test. Dans M. A. Regan, J. D. Lee, et K. L. Young (Eds.), *Driver distraction : Theory, Effects and Mitigation*, 107–122. CRC Press.

Mayrhofer, M., Schlüsselberger, J. S. R., Wentink, M., et Bles, W. (2009). Optimal motion control of next generation simulator motion platform Desdemona for car driving application. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 173–199.

McCauley, M. E. et Sharkey, T. J. (1992). Cybersickness : Perception of self-motion in virtual environments. *Presence 1*(3), 311–318.

McLane, R. C. et Wierwille, W. W. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. *Human Factors 17*(5), 488–501.

McLeod, R. W. et Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception 12*, 417–423.

McRuer, D. T., Allen, R. W., Weir, D. H., et Klein, R. H. (1977). New results in driver steering control models. *Human Factors 19*(4), 381–397.

Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models : what do we know, what should we do ? Dans L. Evans et R. C. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety*, 485–520. New York : Plenum Press.

Mohellebi, H., Kheddar, A., et Espié, S. (2009). Adaptive haptic feedback steering wheel for driving simulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology 58*(4), 1654–1666.

Mudd, S. (1968). Assessment of the fidelity of dynamic driving simulators. *Human Factors 10*(4), 351–358.

Navarro, J. (2008). *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire.* Thèse de doctorat, Université de Nantes, U.F.R. de Psychologie.

Navarro, J., Mars, F., Forzy, J., El-Jaafari, M., et Hoc, J. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention 42*(3), 904–912.

Navarro, J., Mars, F., et Hoc, J. (2007). Lateral control assistance for car drivers : a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors 49*(5), 950–960.

Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise controls in critical traffic situations. Dans *Proceedings of the second World Congress on Intelligent Transport Systems.*

Nordmark, S., Jansson, H., Palmkvist, G., et Sehammar, H. (2004). The new VTI driving simulator. multi purpose moving base with high performance linear motion. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 45–55.

Organisation de Coopération et de Développement Économiques (1990). Behavioural adaptations to changes in the road transport system. *Rapport OCDE, Paris.*

Page, N. G. R. et Gresty, M. A. (1985). Motorist's vestibular disorientation syndrome. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry 48*, 729–735.

Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use : empirical studies and quantitative models. *Ergonomics 43*(7), 931–951.

Parasuraman, R. et Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation : an attentional integration. *Human Factors 52*(3), 381–410.

Parasuraman, R. et Riley, V. (1997). Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors 39*(2), 230–253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., et Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans 30*(3), 286–297.

Parrish, R. V. et Martin, D. J. (1976). Comparison of a linear and a nonlinear washout for motion simulators utilizing objective and subjective data form CTOL transport landing approaches. *NASA technical note D-8157*.

Paul Tomillo, A. M., Sanz Sacristán, J. M., Gago Fernández, C., García Quinteiro, E., Díez Gil, J. L., Blanco Lorenzo, R., López Vázquez, P., Martínez Abalo, J., et Leiro Duarte, F. (2009). Risk analysis of road tunnel using an advanced driving simulator to assess the influence of structural parameters in tunnel safety. Dans *Proccedings of Driving Simulation Conference*, 69–79.

Petzoldt, T., Bär, N., Ihle, C., et Krems, J. F. (2011). Learning effects in the lane change task (LCT)—Evidence from two experimental studies. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour 14*(1), 1–12.

Pinto, M. (2007). *Les interactions multisensorielles dans la perception du mouvement longitudinal. Implications pour les simulateurs de conduite*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 2.

Pinto, M., Cavallo, V., et Ohlmann, T. (2008). The development of driving simulators : toward a multisensory solution. *Le Travail Humain 71*(1), 62–95.

Portouli, V. et Papakostopoulos, V. (2006). On-road study on short-term effects of ADAS on driving behaviour. *AIDE Deliverable 1.2.3*.

Probst, T., Krafczyk, S., Brandt, T., et Wist, E. R. (1984). Interaction between perceived self-motion and object-motion impairs vehicle guidance. *Science 225*(4661), 536–538.

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., et McNamara, J. O. (2005). *Neurosciences*. Bruxelles : De Boeck, traduit par J.-M. Coquery.

Ranjitkar, P., Nakatsuji, T., et Kawamua, A. (2005). Car-following models : An experiment based benchmarking. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies 6*, 1582–1596.

Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior : A review of their evolution. *Accident Analysis & Prevention 26*(6), 733–750.

Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam : Elsevier.

Reason, J. T. et Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. London : Academic Press.

Regan, M. A., Triggs, T. J., Young, K. L., Tomasevic, N., Mitsopoulos, E., Stephan, K., et Tingvall, C. (2006). On-road evaluation of intelligent speed adaptation, following distance warning and seatbelt reminder systems : Final results of the TAC SafeCar Project. *Monash University Accident Research Center*.

Reid, L. D. (1983). A survey of recent driver steering behavior models suited to accident studies. *Accident Analysis & Prevention 15*(1), 23–40.

Reid, L. D. et Nahon, M. A. (1988). Simulator motion drive algorithms : a designer's perspective. *Journal of Guidance 13*(2), 356–362.

Reid, L. D., Solowka, E. N., et Billing, A. M. (1981). A systematic study of driver steering behaviour. *Ergonomics 24*(6), 447–462.

Repa, B. S., Leucht, P. M., et Wierwille, W. W. (1982). The effect of simulator motion on driver performance. *Society of Automobile Engineers*.

Reymond, G. et Kemeny, A. (2000). Motion cueing in the renault driving simulator. *Vehicle System Dynamics 34*, 249–259.

Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., et Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving : driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors 43*(3), 483–495.

Roe, C., Brown, T., et Watson, G. (2007). Factors associated with simulator sickness in a high-fidelity simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference North America*.

Rothengatter, T. (2002). Drivers' illusions - no more risk. *Transportation Research Part F 5*, 249–258.

Rudin-Brown, C. M. et Noy, Y. I. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record 1803*, 30–37.

Rudin-Brown, C. M. et Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (acc) : implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour 7*(2), 59–76.

Saad, F. (2006). Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work 8*(3), 175–181.

Sanders, A. F. (1979). Some remarks on mental load. Dans N. Moray (Ed.), *Mental workload, its theory and measurement*, 41–77. New York : Plenum Press.

Sheridan, T. B. et Verplanck, W. L. (1978). Human and computer control of undersea teleoperators. *MIT Man-Machine Systems Laboratory*, Cambridge, MA.

Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., et Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator : contributions of motion cueing in elementary driving tasks. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference 2001*, 21–32.

Smiley, A. (2000). Behavioral adaptation, safety, and intelligent transportation systems. *Transportation Research Record 1724*, 47–51.

Stanton, N. et Glendon, I. (1996). Risk homeostasis and risk assessment. *Safety Science 22*, 1–13.

Stanton, N. A. et Pinto, M. (2000). Behavioural compensation by drivers of a simulator when using a vision enhancement system. *Ergonomics 43*(9), 1359–1370.

Subramanian, H. (1996). *Estimation of Car-Following Models*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology.

Sullivan, J. M., Tsimhoni, O., et Bogard, S. (2008). Warning reliability and driver performance in naturalistic driving. *Human Factors 50*(5), 845–852.

Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment : the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics 31*(4), 491–506.

Summala, H., Nieminen, T., et Punto, M. (1996). Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors 38*(3), 442–451.

Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., et Droulez, J. (2003). Influence of steering wheel torque feedback in a dynamic driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference North America*.

Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., et Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance : driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics 45*(4), 375–388.

Torrieri, V., D'Apuzzo, M., Galante, F., Pernetti, M., Ganieux, D., Troale, A., et Gallée, G. (2008). Effects of road pavement profiles on driver behaviour in the TEST driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 147–159.

Törnros, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel - a validation study. *Accident Analysis & Prevention 30*(4), 497–503.

van der Laan, J. D., Heino, A., et 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 Driel, C. (2007). *Driver support in congestion : an assessment of user needs and impacts on driver and traffic flow*. Thèse de doctorat, University of Twente.

van Winsum, W., de Waard, D., et Brookhuis, K. A. (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour 2*(3), 139–149.

van Winsum, W. et Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors 38*(3), 434–441.

Villame, T. (2004). Conception de systèmes d'assistance au conducteur : comment prendre en compte le caractère complexe, dynamique et situé de la conduite automobile ? cognition située et conception de systèmes d'assistance au conducteur. *@ctivités 1*(2), 146–169.

Wang, B., Hensher, D. A., et Ton, T. (2002). Safety in the road environment : a driver behavioural response perspective. *Transportation 29*, 253–270.

Watson, G. S. (2000). A synthesis of simulator sickness studies conducted in a high-fidelity driving simulator. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 69–78.

Weir, D. H. et McRuer, D. T. (1968). A theory for driver steering control of motor vehicles. Dans *47th Annual Meeting of the Committee on Road User Characteristics*, 7–28.

Weller, G. et Schlag, B. (2007). Road user behaviour model. *RIPCORD-ISERET Deliverable D8*.

Weller, G., Schlag, B., Gatti, G., Jorna, R., et van de Leur, M. (2006). Human factors in road design. state of the art and empirical evidence. *RIPCORD - ISEREST, RI-TUD-WP8-R1-V5-Human-Factors*.

Wierwille, W. W., Casali, J. G., et Repa, B. S. (1983). Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. *Human Factors 25*(1), 103–116.

Wilde, G. J. S. (1994). *Target risk*. PDE Publications.

Wilson, M., Stephenson, S., Chattington, M., et Marple-Horvat, D. E. (2007). Eye movements coordinated with steering benefit performance even when vision is denied. *Experimental Brain Research 176*, 397–412.

Wilson, T. et Best, W. (1982). Driving strategies in overtaking. *Accident Analysis & Prevention 14*(3), 179–185.

Wilson, T. B., Butler, W., McGehee, D. V., et Dingus, T. A. (1997). Forward-looking collision warning system performance guidelines. *SAE Technical Paper 970456*.

Younsi, K., Floris, J., Rajaonah, B., Simon, P., Loslever, P., et Popieul, J.-C. (2009). Study of driver's behavior during overtaking situations. Dans *International Conference on Road Safety and Simulation*, Paris, France.

Zador, P. L., Krawchuk, S. A., et Voas, R. B. (2000). Automotive collision avoidance system (ACAS) program : Final report. *Washington, DC : NHTSA*.

Zeeb, E. (2010). Daimler's new full-scale, high-dynamic driving simulator - a technical overview. Dans *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 157–165.

Annexes

Annexe A

Articles publiés

A.1 Koustanaï, A., Mas, A., Cavallo, V., et Delhomme, P. (2010). Familiarization with a forward collision warning on driving simulator : cost and benefice on driver-system interactions and trust. *Proceedings of Driving Simulation Conference*, pp. 169-179.

Familiarization with a Forward Collision Warning on driving simulator: cost and benefit on driver-system interactions and trust

Arnaud Koustanai, Arnaud Mas*, Viola Cavallo, Patricia Delhomme

INRETS, Laboratory of Driver Psychology, the French national institute for transportation and safety research (INRETS)

Le2i Arts & Métiers ParisTech – CNRS, Technical Center for Simulation Renault

arnaud.koustanai@inrets.fr, arnaud.mas@renault.com, viola.cavallo@inrets.fr, patricia.delhomme@inrets.fr

Abstract - *Introducing Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) into the vehicle could improve drivers' comfort and reduce road crashes. However, suitable methods are required to study driver/system interactions. In fact, ADAS generate critical use cases, i.e. situations where alarms, or absence of alarms, can be negative for safety. The present study aimed at evaluating the impact of getting familiar, by means of a driving simulator, with critical situations when using the Forward Collision Warning system (FCW). We hypothesized that experiencing the system's function in critical situations would improve drivers' performance and their trust in the FCW. We compared judgments and driving performance of three independent groups: a "control group" where drivers did not use the FCW, an "unfamiliarized group" where drivers used the FCW without having been familiarized with the system, and a "familiarized group" where drivers used the FCW after having been familiarized. Results showed that familiarization made driver/system interactions more effective and safer. Moreover, familiarized drivers rated the system more positively than unfamiliarized drivers. However, familiarization decreased drivers' self-confidence and did not prevent from haste when overtaking slow vehicles. We discussed the relevance of using a driving simulator in FCW's studies and the possibility to transfer skills and knowledge to field operational tests. Finally, we proposed possible improvements to make the familiarization with the system still more effective.*

Résumé - *Introduire des systèmes avancés d'aide au conducteur dans le véhicule pourrait augmenter le confort des conducteurs et réduire le nombre d'accidents. Toutefois, des méthodes d'évaluations adaptées sont nécessaires à l'étude des interactions conducteur/système. Les systèmes d'aide génèrent effectivement des cas d'usage critiques, i.e. des situations ou les alertes, ou*

l'absence d'alertes, peuvent être négatives pour la sécurité. L'objectif de la recherche était d'évaluer l'impact de la familiarisation avec les cas critiques d'usage du Forward Collision Warning (FCW) sur simulateur de conduite. Nous avons testé l'hypothèse selon laquelle l'expérience du fonctionnement du FCW dans des situations critiques d'usage augmente la performance de conduite et la confiance des conducteurs dans le système. Nous avons comparé les jugements et la performance de conduite de trois groupes expérimentaux : un groupe contrôle où les conducteurs n'utilisaient pas le FCW, un groupe « non familiarisé » où les conducteurs utilisaient le système sans avoir été familiarisés et un groupe « familiarisé » où les conducteurs utilisaient le système après avoir été familiarisés. Les résultats montrent que la familiarisation rend les interactions conducteur/système plus efficaces et plus sûres. Par ailleurs, les conducteurs familiarisés ont des opinions plus positives sur le FCW comparé aux non familiarisés. Néanmoins, la familiarisation diminue la confiance des participants dans leur capacité de conduite. De plus, elle ne permet pas d'éviter que les conducteurs dépassent de façon trop précipitée les véhicules lents. Nous discutons la pertinence du simulateur pour l'étude du FCW et la possibilité de transfert des connaissances à la conduite sur route réelle. Finalement, nous proposons des améliorations pour rendre la familiarisation avec le système plus efficace.

Introduction

The present study forms part of the French MATISS project (Advanced Modeling of Interactive Simulation Techniques for Safety), which objective is to implement valid methodologies to study Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) on driving simulators. Introducing ADAS technologies is a major challenge for road safety. In particular, warning devices could help drivers to avoid or limit the impact of a large number of accidents. However, using automation involves behavioral changes which may lead to unsuitable reaction, annoyance, distraction, overreliance, or attentional overload (e.g. Bainbridge, 1987; Kantowitz, 2000; Parasuraman & Riley, 1997). The development of ADAS therefore requires suitable methods to study driver/system cooperation so that their interactions are not negative for road safety.

The Forward Collision Warning system (FCW) well illustrates this point. The system aims at informing drivers of the critical decrease in the distance headway. The FCW has thus a potentially important safety benefit since one accident out of four is a rear-end collision where drivers were distracted. However, drivers are reluctant to use the system because it fails to provide precise information in many occasions. For example, FCW often generates nuisance alarms (NAs) – i.e. alarms triggered by events that do not pose a threat to the drivers (cf. Zador, Krawchunk, & Vaos, 2000). This is typically the case when the lead vehicle slows down in order to change direction or when the driver prepares to overtake another vehicle (e.g. LeBlanc, Eby, Bareket, & Vivoda, 2008). NAs may annoy drivers and lead to inappropriate reactions. On the other hand, some alarms are intentionally suppressed to limit false alarms – i.e. alarms triggered in absence of danger. For

 © Les collections de l'INRETS

instance, the FCW tested by General Motor Corporation (GMC, 2005) did not trigger alarms when it detects fixed targets because they usually correspond to objects out of the road (e.g. road signs). Furthermore, the system was unavailable below a minimum speed of 50 km/h which usually corresponds to situations were irrelevant targets are numerous (e.g. urban areas, traffic congestion). In addition, the FCW did not trigger alarms when it detects vehicles that do not move in the same direction as the equipped-car since they usually correspond to oncoming vehicles on adjacent lanes or stopping at junctions. However, alarm suppression may delay drivers' reactions and decrease the perceived effectiveness of the system (Parasuraman, 2000).

When using FCW, drivers must adjust their response according to the situation rather than react stereotypically. Consequently, drivers have difficulty to trust the FCW (i.e. to determine whether the system will help them identify hazards in situations characterized by uncertainty and vulnerability, cf. Bliss & Acton, 2003), making less effective drivers/system interactions. Field Operational Test studies (FOT) – where the accuracy of instructions and training are vital – suggested that detailed description of the system's function and training in normal operating situations are not enough for the driver to trust the system (e.g. GMC, 2005; Portouli & Papakostopoulos, 2006; Regan *et al*., 2006; LeBlanc *et al*., 2008). GMC (2005) noted that drivers appeared to "probe" the FCW function in extreme conditions to better understand its capabilities and limitations. In the same vein, Cahour and Forzy (2009) assumed that the projection into the use of a cruise control system improves trust and exploration of the device. The authors found that drivers knew more, produced less distorted reconstruction, and had a deeper level of understanding of the system's function after watching video recordings of critical situations than after reading written instructions. Thus, driving simulator studies may be helpful in experiencing such informative-critical situations in safe conditions.

The present research aims at evaluating the impact of the familiarization with some use cases of the FCW on drivers' behavior and trust in the system. We hypothesized that the knowledge of the system's function in critical situations would improve the performance of drivers who use the FCW compared to those who drive without. Furthermore, we expected that drivers' performance and trust in the system would increase more when this knowledge is acquired by practice than by reading a detailed description.

Method

Participants

Twenty nine drivers took part in the experiment (21 males, 8 females). Participants were distributed into three independent groups. In a "control group" (10 drivers; mean age = 38.6 years; SD = 10.88), drivers were not familiar and did not use the FCW during the experiment. In an "unfamiliarized group" (12 drivers; mean age = 41.95 years; SD = 9.2), drivers used the FCW without being familiar with the system. In a "familiarized group" (7 drivers; mean age = 43.1 years; SD = 9.5), drivers used the FCW after being familiarized. Participants had more than 5

years of driving experience and drove more than 10 000 km per year. Statistical analyses showed no difference in age and driving experience between groups.

Apparatus

The experiment was performed on the CARDS2 simulator at RENAULT-Technical Center for Simulation (Guyancourt, France). The simulator cockpit was equipped with a fully functional car dashboard, with force feedback steering wheel, clutch, brake and gas pedal, manual gear lever, and dashboard indicators. The simulator was mounted on a 6-DOF hexapod motion platform, allowing a displacement of ± 20 cm and a rotation of ± 20°. The image was projected on three screens in front of the cabin, providing a visual angle of 150° horizontally and 40° vertically. The rear image was displayed on two LCD screens located in the rear-view mirrors; the image of the inside mirror was incrusted in the front view.

Two additional screens were specifically added for this experiment (Fig.1.): one behind the steering wheel, to display the FCW system interface, and another one on the dashboard, above the gear lever, to display the secondary task interface. A small keyboard was fixed behind the gear lever, in order to interact with the secondary task

The motion platform was deactivated for this experiment. Hexapod motion platforms provide insufficient perception of longitudinal accelerations, especially during braking (Nordmark, Jansson, Palmkvist, & Sehammar, 2004). As time-to-collision perception involves mostly visual components (McLeod & Ross, 1983), it was expected for the present experiment that motion rendering would not provide a crucial cue.



Figure 1. Illustration of simulator setup, showing the FCW system displaying an alarm (red bar) and the secondary task interface (on the bottom right)

 © Les collections de l'INRETS

The FCW issued a single visual-plus-tone alert when the distance from the lead vehicle became too short to avoid a collision. The timing was determined by the ISO-recognized Stop-Distance-Algorithm (ISO 15632) defined as following:

$Dw = Vl \times RT + Vf^2 / (2 \times Df) - Vl^2 / (2 \times Dl)$,

where *Dw* (m) is the warning distance, *Vf* (m/s) the speed of following driver, *Vl* (m/s) the speed of leading vehicle, *Df* (m/s^{-2}) the assumed deceleration of the following vehicle, *Dl* (m/s^{-2}) the assumed deceleration of the leading vehicle, and *RT* is the assumed driver's reaction time to an event. The *RT* value was fixed at 1.25 s, whereas *Dl* and *Df* were fixed at 5 m/s^{-2}.

The visual interface consisted of a light bar which could be presented in three states: (1) it was yellow below 50km/h when the system was inactive, (2) green above 50 km/h when the system was active, and (3) red when the distance from the lead vehicle became less than the warning distance. A three-bip-tone sounded when the bar changed from green to red; the bar remained red as long as the distance was too short.

The distractive task (Fig. 2.) consisted of locating a target circle (150 mm in diameter, 4 mm in thickness) among 35 distracters (125 mm in diameter, 3 mm in thickness).

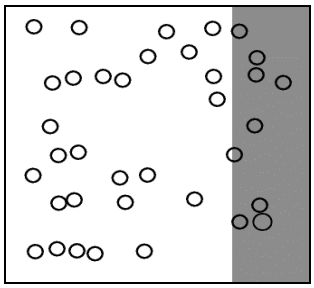


Figure 2. Schematic representation of the distractive task: participants selected the target zone by moving the grey bar

The participants selected the target zone by pressing two keys which moved a grey vertical bar. The task ended when they pressed a validation key that switched off the device. A new task started when the experimenter switched on the device.

Design and procedure

The experiment consisted in three sessions: a practice, a familiarization, and a test session. In the practice session, participants were familiarized with the simulator. They drove on a dual carriageway without traffic during 10 min. Then, they practiced the distractive task while following a car.

In the familiarization session, familiarized and unfamiliarized drivers started with reading written instructions about the FCW's functioning. This note specified the different states of the system (unavailable below 50 km/h, available above 50 km/h) and some critical use cases (no detection of vehicles which are stopped, or vehicles that have a differential speed greater than 70 km/h, or those that are

moving in a different direction than the driver). Then, all drivers interacted with traffic in two 8 min runs: the first one in which they were accompanied by the experimenter, who explained how to perform in the encountered situations, and the other one alone. Because control and unfamiliarized drivers did not use the FCW, the session was presented as making them familiar with the virtual environment. For familiarized drivers, the session aimed at becoming familiar with the FCW. All participants experienced situations where the FCW did not give a warning, i.e. they encountered a parked vehicle, a vehicle which started slowly in front of the driver, and an oncoming vehicle in a bend. They also experienced situations that triggered relevant alarms, i.e. they faced a lead vehicle stopping by an emergency braking (-5 m/s^{-2}). Then, participants encountered situations likely to produce nuisance alarms, i.e. they faced a lead vehicle slowing down smoothly (-2 m/s^{-2}). The run ended when the participants overtook a slow vehicle that triggered a nuisance alarm. Additionally, familiarized drivers tested freely the FCW by accelerating and slowing down while the lead vehicle moved at a constant speed of 90 km/h. After the drive, participants filled out a self-assessment questionnaire about their driving (self-confidence and self-performance). In addition, familiarized and unfamiliarized drivers filled out a questionnaire about the FCW (trust, performance, and acceptance). The total familiarization session lasted 20 to 25 min.

In the test session, participants were asked to drive a round trip on a rural dual carriageway. They were asked to maintain a speed of 90 km/h while doing the distractive task as fast as possible. However, safety remained their priority, i.e. they could neglect the distractive task if the situation required their attention. They encountered five types of events counterbalanced between the way there and the return. In two “junction scenarios”, alarm was not triggered by a vehicle crossing the junction at 3 s from the drivers. In two “merging scenarios”, alarms were triggered by a vehicle merging into the lane in front of the driver at a time headway of 1 s. Drivers were not necessarily required to brake to avoid a collision. In two “overtaking scenarios”, alarms where triggered when drivers overtook a heavy vehicle moving at 70 km/h. In two “relevant scenarios”, alarms were triggered by the lead vehicle braking (-3 m/s^{-2}). In two “annoying scenarios”, alarms were triggered by events which presented the same kinematics than “relevant scenarios”, except that the lead vehicle activated the indicator 5 s before turning. Drivers could thus avoid a collision without braking if they started slowing down at the time the lead vehicle signaled its intention to turn. The test session ended with an “emergency scenario” where an alarm was triggered by an emergency braking vehicle (-5m/s^{-2}).

The distractive task started 1.5 s before the beginning of the scenarios, in such a way that drivers were always distracted when a danger occurred. To limit the task/event association, 9 distractive tasks were randomly assigned between events.

After the drive, participants again filled out self-assessment questionnaires (self-confidence and self-performance). In addition, familiarized and unfamiliarized drivers were asked to fill out questionnaires with regard to the FCW (trust, performance, mental effort, and acceptance). The total test session lasted about 65 min.

 © Les collections de l’INRETS

Results and discussion

Behavioral changes

Globally, FCW users (familiarized and unfamiliarized drivers) released accelerator or applied brake faster than control drivers ($F(2,425) = 31.25$; $p < .000$). However, only familiarized drivers kept longer time headways before the beginning of the scenarios ($F(2,16217) = 59.37$; $p < .000$), i.e. they gained time to react even when the FCW could inform them at the time they were distracted. These results are shown in Figures 3a and 3b.

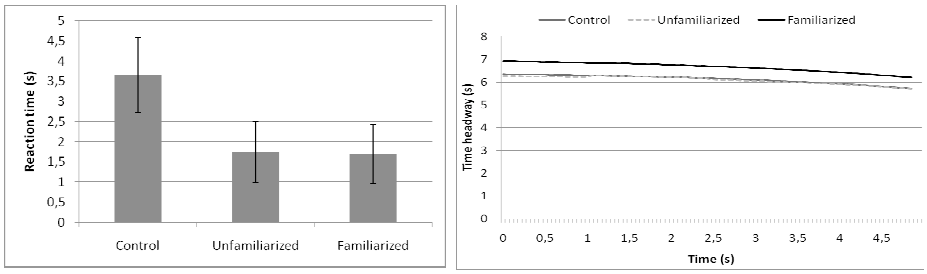


Figure 3. (a) Reaction time; (b) Time headway for 5 s before the beginning of scenarios

Between the onset of the scenario and the end of alarms (or when the vehicle leaved the driver's lane in junction scenarios), mean safety margin was higher ($F(2,30059) = 39.77$; $p < .000$) whereas mean deceleration was lower ($F2,31417) = 171.7$; $p < .000$) for familiarized than for unfamiliarized drivers. This behavior obviously led to safer driving. In particular, familiarized drivers had no collisions whereas unfamiliarized (20%) and control drivers (40%) collided in the emergency scenario. These results are shown in Figures 4a and 4b.

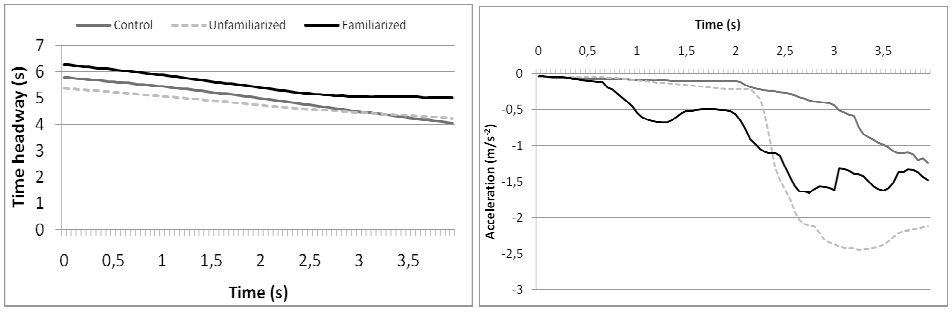


Figure 4. (a) Time headway for 4 s after the scenario started; (b) Deceleration for 4 s after the scenario started

Moreover, FCW users released the accelerator more often than control drivers before the lateral vehicle started crossing their lane in junction scenarios ($\chi^2 1 = 4.46$; $p < .04$). Alarm suppression thus led drivers to better anticipate this event.

There was no particular change in behavior amongst drivers in relevant and annoying scenarios. In fact, only 20% of the participants released the accelerator before the alert was triggered in annoying scenarios, i.e. few drivers slowed down when the lead vehicle activated the indicator. Because drivers were distracted, we suppose that they had difficulty in anticipating the lead vehicle's braking, thus making alarms relevant.

FCW led to negative effects for safety in overtaking scenarios, since FCW users spent less time behind the vehicle they overtook than control drivers ($F(2,10369) = 333.88$; $p < .000$). They changed lane about 6 s after the alert began whereas control drivers changed lane after 15.77 s. Hurry in overtaking maneuvers decreases the time to seek for oncoming traffic (e.g. Wilson & Best, 1982). Being familiar with the FCW did not prevent unsafe precipitation of the maneuver.

In merging scenarios, most of control drivers (60%) did not react when the vehicle merged into their lane whereas most of familiarized (82%) and unfamiliarized drivers (72%) released the accelerator or broke (respectively, $\chi^2_1 = 6.12$; $p < .02$; $\chi^2_1 = 5.82$; $p < .02$). However, deceleration was smoother for familiarized than for unfamiliarized or control drivers ($F(2,1783) = 58.3$; $p < .000$), i.e. being familiarized reduced reaction intensity. Alarms clearly elicited a reaction, but deceleration (between -0.06 and -0.16m/s^{-2}) was not likely to create a threat, even when another vehicle followed closely FCW users.

Subjective changes

Concerning the drivers' self-assessment (Fig. 5a), familiarized and unfamiliarized drivers were prone to find scenarios easier to manage than did control drivers (respectively, $t(14) = 2.01$; $p = .063$ and $t(20) = 2.84$; $p < .01$). However, familiarized drivers were less confident in their driving performance (Fig. 5b) than unfamiliarized and control drivers after the familiarization session (respectively $t(15) = 2.16$; $p < .046$ and $t(14) = 3.24$, $p < .005$) or the test session (respectively, $t(15) = 2.01$; $p = .062$ and $t(14) = 3.39$; $p < .04$).

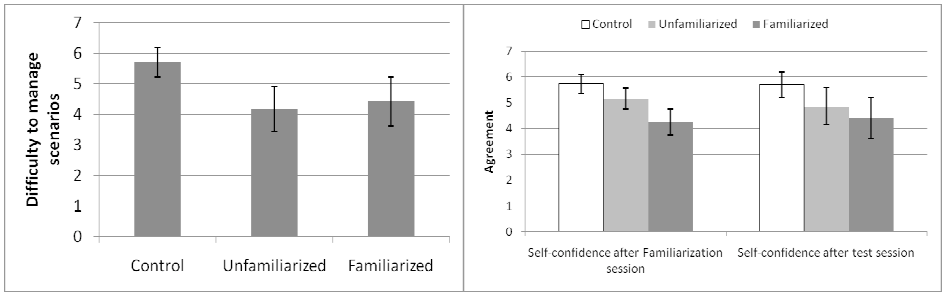


Figure 5. (a) Rating of difficulty to manage scenarios; (b) Rating of self-confidence after familiarization and test session

This result was expected since the presentation of negative aspects of the system may undermine trust and confidence (Cahour & Forzy, 2009). Also, it is

 © Les collections de l'INRETS

consistent with Ivanic & Hesketh (2000), who found that “error training” improved driving skills but decreased drivers’ self-confidence. In fact, the familiarization session may have amounted to error training since drivers learned how to deal with the error-prone FCW by reacting/not reacting when an alarm was present/absent. Nevertheless, the decrease in self-confidence is likely to explain that familiarized drivers kept longer time headways and adopted safer behaviors. Actually, familiarized drivers did not estimate that the mental effort was higher than unfamiliarized drivers. On the contrary, they found that the frequency of alarms was not higher than necessary whereas unfamiliarized drivers found that it was slightly too high ($t(16) = 2.2.$; $p < .042$). Moreover, familiarized tended to rate the system more useful ($t(16) = 1.98$; $p = .063$), less frustrating ($t(15) = 1.95$; $p = .069$) and were willing to pay more to buy the system ($t(14) = 2.03$; $p = .061$. These results suggest that being familiar with the FCW was likely to have a positive influence on drivers’ trust. However, acceptance did not differ between groups; acceptance increased after the test session and utility became greater than satisfaction ($F(3,45) = 19.79$; $p < .000$).

Conclusions

FOT studies showed that drivers understood and used better ADAS after probing them in extreme conditions or after being projected into critical situations (cf. GMC, 2005; Cahour & Forzy, 2009). Our findings extended these results to a driving simulator where experiencing critical situations proved to be very relevant for the study of the FCW. First, the familiarization with critical use cases made driver/system interactions more effective and safer. Familiarization had also a positive influence on subjective rating of the system. Changes in behavior and subjective rating were more positive when drivers experienced situations than when they red written description. Thus, a preliminary handling of the system on a driving simulator could be useful in FOT where instructive situations are constrained by the unfolding events or self-created by the drivers. Driving simulators provide the opportunity to create situations where drivers can probe efficiently the capacities and the limitations of the FCW without taking risks. Short- and long-term effects of the knowledge transfer from simulator to real world would be interesting to investigate.

Regarding future applications, the familiarization session could be further improved to make it more effective. For example, our study showed that the FCW encouraged the drivers to escape too quickly from the warning zone indicated when they prepared to overtake a vehicle. A familiarization focused on this use case could counteract its negative effect for safety. Familiarization with the FCW also appeared to decrease drivers’ self-confidence. Further research should determine the real impact of this effect on the behavior adopted by familiarized drivers.

Lastly, our driving simulator study showed that FCW users were more careful towards dangers that were not indicated. This is a positive result since recent studies on driver-centered design recommended the suppression of as most alarms as possible (e.g. LeBlanc *et al.*, 2008). The driving simulator could thus be very useful to assess the effectiveness of such a system and its impact on safety.

Acknowledgment: We acknowledge teams of Renault CTS, Renault Ergo/IHM, and OKTAL for their assistance in preparing and running the experiment.

Keywords: Familiarization - Forward Collision Warning - Nuisance alarm - Alarm suppression - behavioral changes - subjective rating

Bibliography

Bainbridge, L. (1987). *Ironies of automation*. New York: Wiley.

Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. *Appl. Ergon., 34*, 499-509.

General Motors Corporation (2005). *Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test (ACAS FOT) (Final program Report No. DOT HS 809 886). Washington DC: NHTSA.*

Cahour, B., & Forzy, J.F. (2009) Does projection into use improve trust and exploration? An example with a cruise control system. *Saf. Sci., 47*, 1260-1270.

Ivanic, K., & Hesketh, B. (2000). Learning from errors in a driving simulation: effects on driving skill and self-confidence. *Ergonomics, 43*, 1966-1984.

Kantowitz, B. H. (2000). In-vehicle information systems: Premises, promises, and pitfalls. *Transportation Human factors, 2*, 359-379.

LeBlanc, D. J., Eby, D. W., Bareket, Z., & Vivoda, J. M. (2008). *On-road Evaluation of the SAVE-IT Vehicle Prototype - Task 14C Final Report for the SAfety VEhicle using adaptive Interface Technology (SAVE-IT) Project (Vol. 1)*: UMTRI.

McLeod, R. W., & Ross, H. E. (1983). Optic-flow and cognitive factors in time-to-collision estimates. *Perception, 12, 417-423.*

Nordmark, S., Jansson, H., Palmkvist, G., & Sehammar, H. (2004). The new VTI driving simulator. Multipurpose moving base with high performance linear motion. *Proc. Driving Simulation Conf. DSC 2004, 45-55.*

Panerai, F., Droulez, J., Kelada, J.-M., Kemeny, A., Balligand, E., & Favre, B. (2001). Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment. *Proc. Driving Simulation Conf. DSC 2001, 91-107.*

Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. *Ergonomics, 43*, 931-951.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, and abuse. *Hum. Factors, 39*, 230-253.

 © Les collections de l'INRETS

Portouli, V., & Papakostopoulos, V. (2006). *On road study on short-term effects of ADAS on driving behaviour* (No. D1.2.4.): IST Programme.

Regan, M., Triggs, T. J., Young, K. L., Tomasevic, N., Mitsopoulos, E., Stephan, K., *et al*. (2006). *On-Road Evaluation of Intelligent Speed Adaptation, Following Distance Warning and Seatbelt Reminder Systems: Final Results of the Australian TAC SafeCar Project*: MUARC.

Wilson, T., & Best, W. (1982). Driving strategies in overtaking

Accid. Anal. & Prev., 14, 179-185.

Zador, P. L., Krawchunk, S. A., & Vaos, R. B. (2000). *Automotive Collision Avoidance (ACAS) Program* (Final Report). Washington, DC: NHTSA.

© Les collections de l'INRETS

A.2 **Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2010). Familiarization with critical situations when using a forward collision warning : effects on driver-system interactions.** ***Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*****, pp. 37-47.**

FAMILIARIZATION WITH CRITICAL SITUATIONS WHEN USING A FORWARD COLLISION WARNING: EFFECTS ON DRIVER-SYSTEM INTERACTIONS.

Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., & Mas*, A.
Laboratory of Driver Psychology, the French national institute for transportation and safety research (INRETS)
25 allée des Marronniers F-78000 Versailles-Satory
* RENAULT, Technical Center for Simulation (CTS), 1 avenue du Golf F-78288 Guyancourt
koustanai@inrets.fr

ABSTRACT: A Forward Collision Warning (FCW) could avoid a large number of rear-end collisions by informing distracted drivers of the danger. However, the FCW generates false and nuisance alarms, or cannot indicate some dangers. These critical situations could lead to unsuitable reactions and diminish acceptance if drivers have a poor understanding of the system's operations. This research aims at evaluating the benefit of familiarization with these situations. In a simulator study we compared drivers' behavior and their acceptance according to whether they used the system in a familiarization session. Results show that familiarization led to better understanding of the FCW, thus making driver/system interactions more effective and safer. However, familiarization had no effect on drivers' acceptance and even decreased their confidence in self-performance. We addressed practical applications for the deployment and rollout of FCW systems.

Rear-end collisions account for 25% of all road accidents [1]. They are the most frequent crash type which constitutes 5% of all fatalities and 53% of all injuries on U.S. highways [2]. In-depth analysis shows that drivers' distraction is the main contributing factor, especially when the drivers are involved in a secondary task [3].

The Forward Collision Warning (FCW) is likely to reduce the number and the severity of these collisions by informing distracted drivers of the critical decrease in the distance from the lead vehicle. However, drivers do not accept the FCW easily. It has been shown that acceptance determines the way which drivers interact with automation (e.g. [4]). For example, the operators do not accept and "disuse" a system that is not reliable, annoying or disturbing [5, 6]. Ideally, the FCW should inform the drivers that he/she must react to avoid a collision. But in fact, the system sometimes fails to provide precise information: for example, the FCW can generate false alarms – i.e. a signal when the danger is absent – when detecting stationary objects located outside the road. False alarms thus strongly decrease the system's reliability and the drivers' trust [7, 8]. On the other hand, the FCW can miss some risk of rear-end collision when the target is out of the beam range (e.g. at a hill crest or in sharp turns). These omissions have even more negative impact than false alarms [9]. Moreover, most of the time the FCW indicates situations where the drivers would be careful (e.g. when following closely). But less frequently, the system also indicates situations where the drivers would brake sharply (e.g. when the lead

vehicle suddenly stops). Consequently, drivers' response must be adjusted according to the situation [10].

If drivers have a poor comprehension of the FCW's operation, then they may react in an unsuitable way in response to false alarms or when they follow too closely, whereas they may react late when a danger is not indicated or when they face an imminent danger. Drivers' comprehension is thus a key to determine when and how they have to react to the situation. Studies on driver-centered design – the adaptation of the driver/machine system to the operator, the task, and the automation's characteristics (e.g. [11]) – succeeded in clarifying the meaning of alarms by modulating their format and/or their timing in accordance with the situations or the drivers' individual differences (e.g. [12, 13, 14, 15, 16]). However, most of the researchers conclude that these adaptations failed to significantly improve drivers' acceptance because the alarms still remain too frequent. In fact, there are many occasions where close following is not dangerous. This is typically the case when the lead vehicle slows down in order to change direction or when the driver prepares to overtake another vehicle (e.g. [17]). Then, the FCW triggers nuisance alarms which are often perceived as false alarms by the drivers [10].

A solution could consist of improving the comprehension of the FCW's functioning. Once the drivers understand when and why an alarm is issued, drivers could be more tolerant towards the system. Studies in Field Operational Tests (FOT) provide information on the way to instruct drivers. Generally, they received oral or written descriptions of the system's purpose, its operation, and the human/machine interface before a practice training (e.g. [14, 17, 19, 20]). Especially, [20] were particularly attentive to the drivers' training, comprehension, and knowledge refreshing. Nevertheless, the FCW was regarded as unacceptable because of false or nuisance alarms. In driving simulator situations, familiarization with the FCW and details about its operation change greatly amongst studies (see [9] and [18] for example).

The literature on the impact of drivers' comprehension is poor. To the best of our knowledge, system comprehension has never been used as an independent variable. The ideal way to instruct drivers is not determined yet. However, FOT suggested that drivers appeared to "probe" the system's function in extreme conditions to better understand capabilities and limitations [14, 19]. Then, confronting the drivers with critical situations could be effective to improve the knowledge of the FCW. To create these situations on a driving simulator would be convenient and safer.

The present research aims at evaluating changes in the drivers' behavior and their acceptance of the system according to their familiarization with the FCW on a simulator. We hypothesize that using the system in critical situations (i.e. when alarms are useless or absent) increases the acceptance and the effectiveness of the driver/system interactions. In addition, we suggest that this knowledge is more effective when drivers experience the situations rather than read a written description. To avoid possible bias related to the individual differences, we neutralized factors which would influence the drivers' acceptance: age, sensation seeking, and preferential headway (see [12, 18]).

1. METHOD

1.1 Participants

Twenty seven drivers took part in the experiment (20 males, 8 females). Data obtained in a practice session were used to determine the composition of three independent homogeneous groups: a "control group" (10 drivers), an "unfamiliarized group" (10 drivers), and a "familiarized group" (7 drivers; see the design and procedure section for a detailed description). Mean age was respectively 38.7 years in the control group (min=24, max=52, SD=10.86), 42.25 years in the unfamiliarized group (min=26, max=53, SD=9.5), and 43.1 years in the familiarized (min=27, max=49, SD=9.5). Sensation seeking score (cf. [21]) was respectively 0.53 (SD=0.17), 0.5 (SD=0.16), and 0.52 (SD=0.16). Preferential time headway was (cf. [18]) 3.36 s (SD=0.89), 3.1 s (SD=1.07), and 3.6 s (SD=3.6). Participants had more than 5 years of driving experience and drove more than 10 000 km per year. Statistical analyses show no difference between groups.

1.2 Apparatus

The experiment took place at the Renault Technical Center for Simulation (CTS) on the driving simulator CARDS2, which used the software SCANeR II. The simulator was fixed-base for this research. The projection system consisted of three Barco Sim4 which provided a 150° horizontal image in the forward visual field. Two LCD screens located on the side mirrors provided a rear view.

The driving simulator was equipped with a FCW which issued a single visual-plus-tone alert when the distance from the lead vehicle became too short to avoid a collision. The timing was determined by the ISO-recognized Stop-Distance-Algorithm (ISO 15632) defined as following:

$$Dw = Vl \times RT + Vf^2 / (2 \times Df) - Vl^2 / (2 \times Dl),$$

where Dw (m) is the warning distance, Vf (m/s) the speed of following driver, Vl (m/s) the speed of leading vehicle, Df (m/s-²) the assumed deceleration of the following vehicle, Dl (m/s-²) the assumed deceleration of the leading vehicle, and RT is the assumed driver's reaction time to an event. The RT value was fixed at 1.25 s, whereas Dl and Df were fixed at 5 m/s-².

The visual interface was displayed on the dashboard, in front of the driver. It consisted of a light bar which could be presented in three states: (1) it was yellow below 50km/h when the system was inactive, (2) green above 50 km/h when the system was active, and (3) red when the distance from the lead vehicle became less than the warning distance. A three-bip-tone sounded when the bar changed from green to red; the bar remained red as long as the distance was too short.

The cabin was also equipped with a distractive device consisting of a 10 x 15 cm screen located on the dashboard, above the gear lever, and a keyboard located on the floor, in front of the gear lever. The distractive task (Fig.1) consisted of locating a target circle (150 mm in diameter, 4 mm in thickness) among 35 distracters (125 mm in diameter, 3 mm in thickness). The participants selected the target zone by pressing two keys which moved a grey vertical bar.

The task ended when they pressed a validation key that switched off the device. A new task started when the experimenter switched on the device.

The drivers' involvement in a distractive task when they encountered a danger provided the advantage to create situations where relevant alarms were more useful while critical situations increased the likelihood of unsuitable reactions.

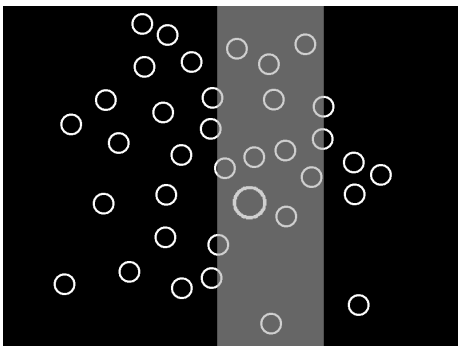


Fig.1. Schemata of the distractive device: the grey bar indicated the target zone.

1.3 Design and procedure

The experiment included three sessions: a practice, a familiarization, and a test session. In the practice session, participants were familiarized with the simulator and their preferential time headway was recorded. First, they drove on a dual carriageway without traffic for 10 min. Then, they followed a vehicle at a minimum safety distance, i.e. the distance just below what seemed dangerous according to their usual driving. They had to continuously adapt this distance while the speed of the lead vehicle oscillated between 70 to 90 km/h. Afterwards they practiced the distractive task when the vehicle was stopped. Finally, they performed the car-following and the distractive task simultaneously. After driving, the participants filled out questionnaires about their background and demographic characteristics. The total practice session lasted 30 to 45 min.

In the familiarization session, participants interacted with traffic in two runs: one in which they were accompanied by the experimenter and the other alone. Each run lasted 8 min. They encountered situations where the FCW did not give a warning: (1) a parked vehicle, (2) a parked vehicle which started slowly in front of them, and (3) an oncoming vehicle in a bend. They also encountered situations that triggered relevant alarms: (4) the lead vehicle stopped by an emergency braking (-5 m/s-²), (5) the lead vehicle slowed down and accelerated smoothly (+/-2 m/s-²). The run ended when (6) the participants overtook a slow vehicle that triggered a nuisance alarm. After the drive, participants filled out a self-assessment questionnaire about their driving (self-confidence and self-performance). The total familiarization session lasted 20 to 25 min.

In the test session, participants were asked to drive a round trip on a rural dual carriageway. They were asked to maintain a speed of 90 km/h while doing the distractive task as fast as possible. However, safety remained their priority, i.e. they could neglect the distractive task if the situation required their attention.

They encountered four types of events occurring between the way there and back: (1) in two scenarios, a vehicle crossed a junction at 3 s from the drivers. Drivers were not necessarily required to brake to avoid it. (2) In two scenarios, a vehicle merged the way in front of the driver from a time headway of 1 s. Again, drivers were not necessarily required to brake to avoid a collision. (3) In two scenarios, drivers were expected to overtake a heavy vehicle speeding at 70 km/h. There was no threat in these situations. (4) In four scenarios, the lead vehicle broke (-3 m/s-²) without stopping completely. Drivers could avoid a collision by braking reasonably. The test session ended with a scenario where an emergency braking vehicle stopped (-5m/s-²). Drivers had to brake sharply to avoid a collision. The distractive task systematically started 1.5 s before the beginning of each event, in such a way that drivers were always distracted when a danger occurred. To limit the task/event association, 9 distractive tasks were randomly assigned between events. After the drive, participants filled out again self-assessment questionnaires on their driving (self-confidence and self-performance).The total test session lasted about 65 min.

Experimental conditions differed according to the given instructions and the usage of the FCW. With the data obtained in the practice session participants were homogeneously distributed into a "control group", an "unfamiliarized group", and a "familiarized group". In the control group, drivers never used the FCW either during the familiarization, or the test sessions. Here, the participants drove in the familiarization session presented as a familiarization with the simulator where the experimenter familiarized the driver on speed, position on the road, and following distance. Data obtained in the test session was used as the baseline driving performance without the FCW to compare driving performance with the FCW.

In the "unfamiliarized group", drivers used the FCW in the test session only. Drivers started the familiarization session with reading written instructions about the FCW's functions. This note specified the different states of the system (i.e. inactive below 50 km/h, active above 50 km/h, alert triggered) and some critical situations when using it (i.e. no detection of vehicles which are stopped, or vehicles that have a differential speed greater than 70 km/h, or those that are moving in a different direction than the driver). The FCW was presented as an aid to avoid collisions if the lead vehicle suddenly brakes hard. Here, the participants drove without the FCW in the familiarization session presented as for the control group, i.e. a familiarization with the simulator. Unfamiliarized drivers filled out additional questionnaires about the FCW after the familiarization (trust, performance, and acceptance) and the test session (trust, performance, mental effort, and acceptance). Then, they gave an a priori judgment about the system based on the read instructions and the situations encountered without the system in the familiarization session. They also gave a posteriori judgment after using the system in the test session.

In the familiarized group, drivers used the FCW both in the familiarization and the test sessions. As in the unfamiliarized group, drivers started the familiarization session by reading the same written instructions on the FCW's functioning. Here, participants drove with the FCW in the familiarization session which aimed to become familiar with the FCW. The experimenter described the system's operation in the encountered situations by explaining why alarms were

triggered or not. Familiarized drivers filled out the same additional questionnaires as in unfamiliarized group after the familiarization and the test sessions. Then, they gave a posteriori judgment on the FCW after using the system in both sessions.

Data was analyzed with non parametric (khi² test, Mann-Whitney's U test) and parametric statistics (factorial ANOVAs, ANOVAs on repeated measures, Student's t test).

2 RESULTS

2.1 Number of alarms and collisions

Control drivers (20.6%) and unfamiliarized drivers (23.56%) received more alarms apart from the scenarios than familiarized drivers (4.22%), i.e. they followed the lead vehicle more often too closely (respectively: $\chi^2 1=4.82$; $p<.03$ et $\chi^2 1=6.66$; $p<.02$).

Collisions occurred exclusively in the last scenario (i.e. emergency braking vehicle). Familiarized drivers had no collisions whereas 20% of unfamiliarized drivers and 40% of control drivers collided. Control drivers had significantly more collisions than familiarized drivers ($\chi^2 1=3.66$; $p=.055$) whereas differences with unfamiliarized drivers were not significant.

2.2 Type of reactions

The time between the start of events and the drivers' reaction (brake or accelerator release) was shorter for familiarized and unfamiliarized compared to control drivers ($F(2,425)=31.25$; $p<.000$).

The reactions to the merging vehicle scenarios were different according to the group: the majority of familiarized drivers (83.34%) and unfamiliarized drivers (72.32%) broke or released the accelerator whereas only a minority of control drivers (39.14%) reacted (respectively: $\chi^2 1=6.12$; $p<.02$ and $\chi^2 1=5.82$; $p<.02$).

There is also an order effect for crossing junction scenario: on the way there, all drivers reacted in a similar way when a vehicle crossed the junction, i.e. they released accelerator and broke. But on the return, half of the familiarized (50%) and unfamiliarized drivers (53.84%) already released accelerator when the vehicle started crossing the junction whereas almost all of the control drivers (90%) were still accelerating (respectively: $\chi^2 1=4.41$; $p=.035$ and $\chi^2 1=4.79$; $p=.03$).

2.3 Behaviour before events and during alarms

During the 1.5 s before the beginning of events (i.e. when the distractive task started), familiarized drivers went slower than drivers of the other groups ($F(2,25348)=22$; $p<.000$). Their time headway was also longer ($F(2,16217)=59.37$; $p<.000$).

Between the start and the end of alarms (Table.2.), control and familiarized drivers were driving faster than unfamiliarized drivers ($F(2,31417)=85.2$; $p<.000$). However, unfamiliarized drivers decelerated slightly more sharply than familiarized drivers, who decelerated more sharply than control drivers

(F(2,31417)=171.7 ; p<.000). Consequently, the time headway of the familiarized group was longer than of the unfamiliarized one, which was longer than in the control group (F(2,30059)=39.77 ; p<.000). Taken together, these results suggest that familiarized drivers reacted more smoothly then unfamiliarized and control drivers. However, familiarized drivers maintained longer time headway and lower speed before the beginning of the events. Then, their reaction was more suitable and safer since they ultimately kept longer time headway when the alarm ended without reacting abruptly.

Note that there is a specific result for overtaking scenarios where familiarized (2.1 s) and unfamiliarized (2.32 s) drivers started to overtake much earlier than control drivers (12 s: F(2,10148)=8.5 ; p<.000).

Table.2. Behavioural variables: mean (standard deviation).

	Variables	Control group	Unfamiliarized group	Familiarized group	p
Before events	Speed (km/h)	88.37 (0.13)	88.56 (0.1)	87.8 (0.19)	.000
	Time headway (s)	5.67 (0.26)	5.6 (0.22)	6.08 (0.35)	.000
	Deceleration (m/s-2)	0.008 (0.005)	0.007 (0.004)	0.008 (0.007)	.87
During alarms	Speed (km/h)	82.05 (0.2)	79.61 (0.26)	81.63 (0.41)	.000
	Time headway (s)	4.04 (0.3)	4.81 (0.34)	5.57 (0.45)	.000
	Deceleration (m/s-2)	0.74 (0.02)	1.7 (0.03)	1 (0.05)	.000

2.4 System comprehension and self-assessment

For each event, we asked the drivers "Is it true that the FCW triggered an alarm in this situation?" The Mann-Whitney's U test shows that familiarized drivers made fewer errors than unfamiliarized ones (p<.045). Nevertheless, familiarized drivers were more inclined to believe that the FCW did not trigger an alarm when a vehicle merged in front of them (p<.032).

After the familiarization session, familiarized drivers were less confident in their driving performance (t(14)=3.39; p<.004) and their ability to master the simulator in comparison with control drivers (t(14)=3.24; p<.005).

After the test session, familiarized drivers assessed their global driving performance as being lower than did control drivers (t(14)=2.24; p<.04). However, familiarized and unfamiliarized drivers estimated that avoiding the emergency braking vehicle was easier than did control drivers (respectively: t(14)=2.55; p<.02 and t(20)=2.91; p<.008).

2.5 Acceptance and mental effort

The rating of the acceptance scale (cf. [22]) did not differ between familiarized and unfamiliarized drivers neither after the familiarization nor after the test

session. Acceptance increased for both groups after the test session ($F(3,45)=19.79$; $p<.000$). Utility was greater than satisfaction ($F(1,16)=9.31$; $p<.007$). Also, the mental effort did not differ between the groups (NASA NTLX score). Note that the frustration caused by the use of the FCW (i.e. satisfaction, contentment, or interest vs. discouragement, irritation, annoyance, or stress) tended to be higher for unfamiliarized than for familiarized drivers ($t(15)=1.95$; $p<.069$).

3 DISCUSSION

The familiarization with critical situations when using the FCW produced different effects. First, it led to a better understanding of the system, thus making driver/system interactions more effective and safer. Familiarized drivers adopted longer time headways, they tended to react more quickly than control drivers and more smoothly than unfamiliarized drivers. Familiarized drivers also reduced their speed and increased their time headway before events. In accordance with [23], it seems that they saved time to compensate for attentional impairment. This result suggests that the familiarized drivers paid more attention to the headway control rather than relying on the FCW. This interpretation is in line with better anticipation in situations where the FCW did not issue a warning (crossing junction scenarios). Moreover, familiarized drivers succeeded in avoiding a collision with the emergency braking vehicle, suggesting that the familiarization induced safer behavior even in emergency situations. Lastly, using the system tended to be less frustrating when drivers were familiarized. In sum, the familiarization with critical situations provided a great benefit.

However, the familiarization provided no advantage in some situations. All users of the FCW began to overtake slow vehicles much earlier than control drivers, suggesting that the system should encourage the drivers to escape quickly from the unsafe zone behind the lead vehicle. However, precipitating the maneuver could also be negative for safety (e.g. [24]). Here, the familiarization was not ineffective in avoiding this behavior. Furthermore, all FCW users reacted more often than control drivers when a merging vehicle triggered an alarm. The impact on safety is not obvious but it could be surprising for a driver who follows the users too closely. In this latter case, we suspect that the reaction could be due to the lack of familiarization with this situation which was not experienced in the familiarization session, nor evoked in the written instructions. Familiarized drivers therefore reacted to these alarms, but after the test session they had difficulty to recall an alarm was triggered. Thus, the knowledge acquired in the familiarization session was not extended to the FCW's functioning in new situations.

The familiarization also impacted negatively the drivers' self-assessment. This result is consistent with [25] who found that "error training" led to a better driving performance but reduced drivers' confidence. We propose that experiencing critical situations amounted to experience "error" of the FCW. Then, familiarized drivers could be more cautious in their ability to avoid danger. In addition, we assume that learning the FCW's functioning constituted an additional task. In accordance with [26], we assume that when drivers performed this additional test, they could feel a decrease in their primary driving performance. Moreover,

familiarized drivers had no opportunity to interact with traffic without being assisted by the system. Therefore, they may have had more difficulty in estimating their own driving capacities. However, despite the fact that reducing drivers' confidence obviously increased safety, its long-term impact in real conditions still is an open issue.

Lastly, the familiarization had no effect on the drivers' acceptance of the system. This result is surprising considering the more efficient driver/system interactions. However, the experimental design may account for this finding; first, drivers were systematically distracted when a danger occurred. The alarms were thus quite relevant and helpful for all system users. Second, the studied FCW was not very adaptive and dangers were frequent (about 1 alarm per 3 min). In line with previous research, we assume that the alarm rate was too high to be accepted (see [27]). Finally, individual differences were neutralized across experimental groups. But drivers' age, sensation seeking and preferential time headway are known to influence the system's acceptance. Consequently, the familiarization possibly increased the acceptance of some drivers, but this effect could not be observed with the present design of the study.

4 CONCLUSION

The familiarization with critical situations when using the FCW on the driving simulator improved safety behaviors significantly. Thus, this kind of familiarization could be useful in FOT where instructive situations are constrained by the unfolding events or self-created by the drivers. Familiarization on a driving simulator provides the opportunity to create situations where drivers can probe efficiently the capacities and the limitations of the FCW without taking risks. Short- and long-term effects of the knowledge transfer from simulator to real world would be interesting to investigate.

On the other hand, the familiarization on simulator was disconnected from acceptance improvement or extension of knowledge to new situations. Further research should study the impact of the familiarization by taking into account the factors that are likely to influence the drivers' acceptance. Since the exhaustive replication of critical situations cannot be reasonably envisaged, research should also evaluate which type of situations included in the familiarization can or cannot be generalized.

5 REFERENCES

[1] Najm, W. G., Sen, B., Smith, J. D., & Campbell, B. N. (2003). Analysis of Light Vehicle Crashes and Pre-cash Scenarios based on the 2000 General Estimates System (No. DOT-VNTSC-NHTSA-02-04). Washington, DC: U.S. Department of Transportation.

[2] Knipling, R., Hendricks, D., Koziol, K., Allen, J., Tijerina, L., & Wilson, C. (1992). A front-end analysis of rear-end crashes. IVHS American Second Annual Meeting, Newport Beach, CA.

[3] Knipling, R., Wang, J.-S., & Yin, H.-M. (1993). Rear-end crashes: problem size assessment and statistical description (No. DOT HS 807 994). Washington, DC.

[4] Kantowitz, B. H. (2000). In-vehicle information systems: Premises, promises, and pitfalls. Transportation Human Factors, 2, 359-379.

[5] Lee, J. D., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies, and allocation of function in human-machine systems. Ergonomics, 35, 1243-1270.

[6] Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, and abuse. Hum. Factors, 39, 230-253.

[7] Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. Appl. Ergon., 34, 499-509.

[8] Lee, J. D., and See, K.A. (2004). Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. Hum. Factors, 46, 50-80.

[9] Cotté, N., Meyer, J., & Coughlin, J. F. (2001). Older and Youger drivers' reliance on collision warning systems. Hum. factors and Ergon. Society 45 th Ann. Meet.

[10] Lerner, N. D., Kotwal, B., Lyons, R., & Gardner-Bonueau, D. (1996). Preliminary Human Factors Guidelines for Crash Avoidance Warning Devices (No. DOT HS 808 342). Washington, DC: NHTSA.

[11] Cacciabue, P. C., & Martinetto, M. (2006). A user-centered approach for designing driving support systems: case of collision avoidance. Cognition, Technology & Work, 8, 201-214.

[12] Dingus, T. A., MacGehee, D. V., Manakkal, N., Jahns, S. K., Carney, C., & Hankey, J. M. (1997). Human factor field evaluation of automotive headway maintenance/collision warning devices. Hum. Factors, 39, 216-229.

[13] 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 high-fidelity driving simulator. Hum. Factors, 44, 214-334.

[14] General Motor Corporation (2005). Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test (ACAS FOT) (Final Program Report No. DOT HS 809 886). Washington DC: NHTSA.

[15] Brouwer, R. F. T., & Hoedemaeker, D. M. (2006). Driver support and information systems: Experiments on learning, appropriation and effects of adaptiveness (Final Report No. D1.2.3.): IST.

[16] Roland, J., Horst, D., Paul, A., Blanco, R., & Di Stasi, L. (2007). Adaptive Integrated Driver-vehicle interface (AIDE): User Evaluations of Adaptive Warning Strategies: IST.

[17] LeBlanc, D. J., Eby, D. W., Bareket, Z., & Vivoda, J. M. (2008). On-road Evaluation of the SAVE-IT Vehicle Prototype - Task 14C (Final Report Vol. 1): UMTRI.

[18] Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. M. J. (2008). Potential benefits of an adaptive forward collision warning system. Transp. Res. Part C, 16, 471-484.

[19] Portouli, V., & Papakostopoulos, V. (2006). On road study on short-term effects of ADAS on driving behaviour (No. D1.2.4.): IST.

[20] Regan, M., Triggs, T. J., Young, K. L., Tomasevic, N., Mitsopoulos, E., Stephan, K., et al. (2006). On-Road Evaluation of Intelligent Speed Adaptation, Following Distance Warning and Seatbelt Reminder Systems: Final Results of the Australian TAC SafeCar Project. Victoria, Australia Monash University Accident research Centre.

[21] Carton, S., Jouvent, R., & Widlöcher, D. (1992). Cross-cultural validity of the Sensation Seeking Scale: development of a French abbreviated form. Eur. Psychiatry, 7, 225-234.

[22] van der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of Advanced Transport Telematics. Transp. Res. Part. C, 5, 1-10.

[23] Horrey, W. J., & Simons, D. J. (2007). Examining cognitive interference and adaptative safety behaviours in tactical vehicle control. Ergonomics, 50, 1340-1350.

[24] Wilson, T., & Best, W. (1982). Driving strategies in overtaking. Accid. Anal. Prev., 14, 179-185.

[25] Ivanic, K., & Hesketh, B. (2000). Learnin from errors in a driving simulation: effects on driving skill and self-confidence. Ergonomics, 43, 1966-1984.

[26] Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. Transp. Res. Part F Traffic. Psychol. Behav., 8, 79-96.

[27] Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L., & McCallum, M. (2007). Crash Warning System Interfaces: Human factors Insights and Lessons Learned (Final Report No. DOT HS 810 6979). Washington, DC: NHTSA.

A.3 Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., et Mas, A. (2012, sous presse). Simulator training with a Forward Collision Warning system : effects on driver/system interactions and driver trust. *Human Factors*.

Simulator Training With a Forward Collision Warning System: Effects on Driver-System Interactions and Driver Trust

Arnaud Koustanaï, **Viola Cavallo**, and **Patricia Delhomme**, French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks (Ifsttar), Versailles, France, and **Arnaud Mas**, Renault Technical Center for Simulation, Guyancourt, France

Objective: The study addressed the role of familiarization on a driving simulator with a forward collision warning (FCW) and investigated its impact on driver behavior.

Background: Drivers need a good understanding of how an FCW system functions to trust it and use it properly. Theoretical and empirical data suggest that exploring the capacities and limitations of the FCW during the learning period improves operating knowledge and leads to increased driver trust in the system and better driver-system interactions. The authors tested this hypothesis by comparing groups of drivers differing in FCW familiarity.

Method: During the familiarization phase, familiarized drivers were trained on the simulator using the FCW, unfamiliarized drivers simply read an FCW manual, and control drivers had no contact with the FCW. During the test, drivers drove the simulator and had to interact with traffic; both familiarized and unfamiliarized drivers used the FCW, whereas controls did not.

Results: Simulator familiarization improved driver understanding of FCW operation. Driver-system interactions were more effective: Familiarized drivers had no collisions, longer time headways, and better reactions in most situations. Familiarization increased trust in the FCW but did not raise system acceptance.

Conclusion: Familiarization on the simulator had a positive effect on driver-system interactions and on trust in the system. The limitations of the familiarization method are discussed in relation to the driving simulator methodology.

Application: Practicing on a driving simulator with driving-assistance systems could facilitate their use during real driving.

Keywords: driver assistance, driver-system interaction, driver behavior, familiarization, driver distraction, forward collision warning, system understanding, trust

Address correspondence to Viola Cavallo, French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks (Ifsttar), 78000 Versailles, France; e-mail: viola.cavallo@ifsttar.fr.

HUMAN FACTORS
Vol. XX, No. X, Month XXXX, pp. X-X
DOI:10.1177/0018720812441796
Copyright © 2012, Human Factors and Ergonomics Society.

INTRODUCTION

Forward collision warning systems (FCWs) have the potential to avoid or reduce a large number of collisions. An estimated 25% of motor vehicle crashes involve rear-end collisions (Knipling, Wang, & Yin, 1993; Najm, Smith, & Yanagisawa, 2007). In-depth analyses suggest that the collisions result from tailgating or late detection, wherein driver distraction is the main explanatory factor (Campbell, Smith, & Najm, 2003; Knipling et al., 1993; Wang, Knipling, & Goodman, 1996). An FCW informs drivers of critical headway decreases, which is especially beneficial to safety when drivers are distracted (Lee, McGehee, Brown, & Reyes, 2002).

Introducing an FCW system into the vehicle remains a challenge. Ideally, FCWs should inform drivers of any potentially threatening situation. But in practice, occasions when the system can actually help avoid a collision are rare (Farber & Paley, 1993; Horowitz & Dingus, 1992). In fact, FCWs are prone to triggering nuisance alarms (NAs) when there is no actual threat to drivers (Zador, Krawchunk, & Vaos, 2000). Typically, NAs occur when the lead vehicle slows down prior to turn, when a vehicle in an adjacent lane enters into the beam range, or when a driver follows a vehicle closely before overtaking it (e.g., General Motors, 2005; LeBlanc, Eby, Bareket, & Vivoda, 2008).

NAs have a conflicting effect on the proper use of an FCW. An example of a negative aspect of NAs is that they undermine FCW reliability, which is likely to reduce trust in the system (Abe & Richardson, 2004; General Motors, 2005; Lerner, Kotwal, Lyons, & Gardner-Bonueau, 1996; Wilson et al., 1998). They are also associated with the "cry-wolf" effect (Breznitz, 1984), which may annoy drivers, decrease compliance,

and affect driving behavior. A positive aspect, however, is that NAs may avoid overreliance on the FCW and help drivers understand how the system works (Dzindolet, Pierce, Beck, & Dawe, 2002; Lees & Lee, 2007). Overreliance on automated devices can result in several forms of human error, including decision biases and monitoring failures (Parasuraman, 2000; Parasuraman & Riley, 1997). For example, drivers may assume that the system will detect any target obstacle or impending collision, so they may reduce their own vigilance level (Campbell et al., 1998). Moreover, drivers may be willing to accept higher driving-risk levels and neglect typical safety or collision-avoidance behaviors. Thus, overreliance could lead to an inappropriate reaction or prevent an appropriate reaction if the system misses the target. In short, error-prone systems teach drivers that the system can make mistakes and help them learn to rely more on their own skills (Maltz & Shinar, 2007).

Understanding an FCW's limitations is important since no system can indicate all impending collisions. For example, an FCW may not detect that the lead vehicle is slowing down at the top of a hill or on a sharp turn or that there is an impending collision with a vehicle coming from the side at an intersection (e.g., General Motors, 2005). Moreover, certain FCW warnings may be intentionally inhibited by the system to avoid false alarms. For example, the system may not indicate stationary targets to prevent warnings about objects not on the road, or the system may not be available below 50 km/h, as in urban driving (where close following is frequent and rarely dangerous), and in situations in which collisions are less serious than at higher speeds (General Motors, 2005; LeBlanc et al., 2008). Consequently, understanding how an automated system works leads to more appropriate use of the device (Parasuraman & Riley, 1997).

Data on the relationship between system understanding and driving behavior are scarce. In simulator studies, the FCW is usually introduced to drivers via a description of its purpose. However, system training varies greatly: Drivers may not be trained before the test session (e.g., Cotté, Meyer, & Coughlin, 2001; Graham, 1999), or training may be limited to situations deemed useful to the system (e.g., Abe, Itoh, & Tanaka, 2002; Jamson, Lai, & Carsten, 2008; Lees & Lee, 2007). In other studies, the training given is not documented (e.g., Abe & Richardson, 2006).

Field operational test studies (FOTs)—in which the accuracy of instructions and training are vital—suggest that even a detailed description of system operation accompanied by training in normal operating situations is not sufficient to cause drivers to use the system. Regan et al. (2006) were very careful of the quality, format, and content of the driver instructions and training setup in their study. The experimenter described the FCW in detail before presenting a short computer-based demonstration of the warnings. Then the participants drove the equipped vehicle on the road while the experimenter provided corrective feedback and guidance. The authors nevertheless concluded that the drivers are not interested in keeping the FCW because of NAs.

Interestingly, General Motors (2005) suggested that drivers "probed" the FCW's functionalities to better understand its capabilities and limitations. In fact, most of their test drivers acknowledged having experimented with the FCW. Such exploration is congruent with Muir's (1994) hypothesis that attributing "dependability" to an automated device is facilitated by allowing operators to push the system beyond its usual limits into uncertain and risky scenarios. Fortunately, in none of the FOTs did the probing seem unsafe, but in turn, drivers did not necessarily create or encounter real opportunities to fully explore the FCW's functions.

In another study, Cahour and Forzy (2009) introduced a cruise control system by giving drivers a written function-oriented description, a written use-oriented presentation, or a use-oriented film. The authors found that drivers who watched use-oriented films made a less distorted reconstruction of the functioning and understood the system better. The authors assumed that films helped participants project themselves into the driving situation more effectively than written instructions.

In the present study, we hypothesized that FCW familiarization on the simulator would improve drivers' understanding of how the FCW works, thereby making the system seem

more trustworthy and improving driver-system interactions. We created scenarios that triggered useful warnings, useless warnings, or no warnings at all. The scenarios were paired with a distracting task. We assumed that distraction had the advantage of creating safety-critical situations in which relevant warnings are more useful. To avoid possible bias related to individual differences influencing drivers' trust and acceptance, participant groups were matched on age, sensation seeking (cf. Heino, van der Molen, & Wilde, 1992), and preferential headway (see Dingus et al., 1997; Jamson et al., 2008).

METHOD

Overview

To test our hypothesis, we conducted an experiment on a simulator that included three experimental sessions: practice, familiarization, and test. Three groups were formed on the basis of data obtained in the practice session: a control group that had no contact with the FCW, an unfamiliarized group that read a written description of the FCW during the familiarization session and used the FCW during the test session only, and a familiarized group that read a written description of the FCW and then used the system during the familiarization session and the test sessions.

Participants

The participants, recruited among the Renault technical staff, were 28 drivers (20 men, 8 women) who had more than 5 years of driving experience and drove more than 10,000 km per year. They had no prior experience in using FCWs. The drivers were divided into a control group (n = 10), an unfamiliarized group (n = 12), and a familiarized group (n = 7). The three groups were comparable in preferential time headway (TH), age, and sensation-seeking score. Their preferential THs were 3.4 s, 3.1 s, and 3.6 s, respectively. Their mean ages were 38.7 (SD = 10.9), 42.3 (SD = 9.5), and 43.1 (SD = 9.5) years, respectively. Their sensation-seeking scores (French adaptation of Zuckerman's Sensation Seeking Scale; Carton, Jouvent, & Wildlöcher, 1992) were 21.2 s, 20.0 s, and 20.8 s, respectively. Statistical analyses indicated no differences between the groups.

Apparatus

The experiment was performed on the CARDS2 simulator (see Reymond & Kemeny, 2000, for a detailed description) at Renault Technical Center for Simulation with SCANeRII simulation software. The simulator was fixed based for the present study.

The driving simulator was equipped with an FCW that triggered a single visual-plus-tone warning when the distance from the lead vehicle could become too short to avoid a collision. The warning distance Dw (in meters) was defined by the International Standards Organization–recognized stop-distance algorithm (ISO 15632; see Wilson, Butler, McGehee, & Dingus, 1997) as follows:

$$Dw = Sl \times \mathrm{RT} + Sf^2 / (2 \times Df) - Sl^2 / (2 \times Dl),$$

where Sf is the following vehicle's speed (m/s^2), Sl is the leading vehicle's speed (m/s^2), Df is the following vehicle's assumed deceleration (m/s^2), Dl is the leading vehicle's assumed deceleration (m/s^2), and RT is the driver's assumed reaction time to an event. The RT value was set at 1.25 s (see, e.g., Abe & Richardson, 2006); Dl and Df were set at 5 m/s^2.

The FCW's visual interface was displayed on a screen located above the dashboard in front of the driver. It consisted of a horizontal bar that lit up in one of three colors: (a) yellow, slower than 50 km/h when the system was inactive; (b) green, faster than 50 km/h when the system was active; and (c) red, whenever the lead vehicle's distance went below the warning distance. A three-beep tone sounded when the bar changed from green to red; the bar remained red as long as the distance was too short.

For the distracting-task interface, an additional screen 10 × 15 cm and a keyboard were fastened to the dashboard. The task, an instantiation of the Surrogate Reference Task (see, e.g., Petzold, Bär, Ihle, & Krems, 2011), consisted of locating a target circle among 35 distractors (Figure 1). This task is quite attention demanding in situations in which TH must be controlled (see Jamson & Merat, 2005).

Practice Session

All participants first underwent the practice session, which lasted 30 to 45 min. The aim of this

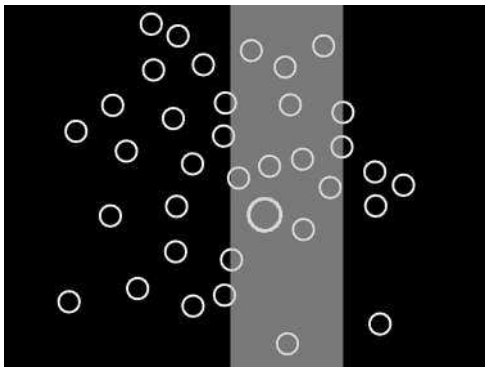


Figure 1. Diagram of the distracting task. The gray band indicates the target zone.

session was twofold: to familiarize participants with the driving simulator and the distracting task and to record data to set up three homogeneous groups of participants. The participants first filled out a background questionnaire and the Sensation Seeking Scale. Then they drove on a simulated two-lane road without traffic for 10 min, after which they followed a vehicle at a minimum safety distance for another 10 min. The following distance was defined as the shortest distance (in their normal way of driving) that they thought was not dangerous for following the vehicle. The participants had to continuously adapt their headway to the lead vehicle's speed, which oscillated between 70 and 90 km/h. After that, they practiced the distracting task when the vehicle was stopped. Last, they performed the car-following and distracting tasks simultaneously. On the basis of their preferential headway, age, and sensation-seeking score, we divided the participants into three homogeneous groups (control, unfamiliarized, familiarized).

Familiarization Session

The familiarization session lasted 20 to 25 min and was aimed at familiarizing the drivers with several traffic situations they would have to manage. Participants drove the driving simulator and carried out two 8-min runs in a two-lane rural road environment. They were accompanied by the experimenter on the first run but drove alone on the second. All participants encountered the same six traffic events (see Table 1), but they received different information and instructions for the familiarization and test sessions.

Control group. For drivers in the control group, who never used the FCW, the familiarization session was presented as a means of getting accustomed to the simulator. On the first run, the experimenter drew the participant's attention to noticing his or her speed, position on the road, and following distance; on the second run, participants drove alone.

Unfamiliarized group. Drivers in the unfamiliarized group did not drive with the FCW in the familiarization session but were familiarized with the system by reading a manual about how the FCW works, that is, the different states of the system (inactive at slower than 50 km/h, active at faster than 50 km/h; timing of warnings) and its limitations (no FCW detection of stopped vehicles, vehicles whose speed differed by more than 70 km/h from the driver's speed, and vehicles moving in a different direction than the driver). After reading the manual, familiarization continued on the simulator in the same conditions as in the control group.

Familiarized group. Participants were familiarized with the FCW by first reading the same manual as the unfamiliarized group about how the FCW functions. They then underwent an "active familiarization" phase, that is, they drove with the FCW and were confronted with situations in which the FCW triggered useful warnings (Scenarios 5 and 6) but also ones in which the FCW did not send out a warning (Scenarios 1, 2, and 3) or it emitted a nuisance alarm (Scenario 4).

On the first run, the experimenter described how the system operated in the situations encountered, so these drivers saw the change in color of the warning light when their speed exceeded 50 km/h and the absence of a warning when they overtook a stationary vehicle or encountered a vehicle just starting up or when an oncoming vehicle was coming around a bend. In the emergency braking situation, they became familiar with the timing of the warnings. The smooth slowing down of the lead vehicle and the overtaking of a slow vehicle were aimed at demonstrating that warnings could be triggered when there was no immediate danger. Finally, the lead vehicle maintained a constant speed, and the drivers could accelerate and decelerate freely to test the FCW. On the

TABLE 1: Familiarization Scenarios

Familiarization scenario	Description	FCW alarm (for familiarized drivers)
1. Stationary parked vehicle	Drivers encountered a stationary parked vehicle.	No alarm
2. Parked vehicle starting to move	Drivers encountered a parked vehicle that started up slowly in front of the driver.	No alarm
3. Vehicle coming around a bend	Drivers encountered an oncoming vehicle coming around a bend.	No alarm
4. Overtaking	Drivers had to overtake a slow vehicle.	Nuisance alarm (no danger)
5. Braking	Drivers had to brake behind a lead vehicle that accelerated and decelerated smoothly (±2 m/s^2) while driving between 70 and 90 km/h.	Useful alarm
6. Emergency braking	Drivers had to brake strongly behind a vehicle that slammed on the brakes (5 m/s^2).	Useful alarm

Note. FCW = forward collision warning.

second run, the familiarized drivers experienced these same situations alone.

Test Session

The test session lasted approximately 65 min and presented drivers with different situations in which they had to interact with traffic. Both familiarized and unfamiliarized drivers used the FCW, whereas controls did not. The participants made a round-trip drive on a simulated two-lane rural road and were asked to maintain a speed of 90 km/h as they performed the distracting task (as fast as possible), while always keeping safety as their top priority. They encountered five types of events (see Table 2). Each event was encountered twice (except the emergency braking situation, which occurred at the end). FCW users (i.e., familiarized and unfamiliarized drivers) received useful warnings in Scenarios 4 and 5, whereas no warning was emitted in Scenario 1. NAs were supposed to be triggered by Scenarios 2 (no danger) and 3 (the lead car's maneuver could be anticipated). The distracting task always started 1.5 s before event onset so that drivers were always distracted when a dangerous event occurred; it lasted between 2 s and 5 s. To limit the task-event association, nine additional, randomly occurring distracting-task trials were carried out between events.

Dependent Variables

The participants' understanding of system operation was assessed after the experiment. The question: "Did the FCW send out a warning in Scenario *X*?" was asked for each of the five test scenarios. The mean number of correct answers was used as a performance indicator. Performance on the distracting task was measured by the error rate (target mislocations) and the number of tasks correctly solved per participant.

The drivers' longitudinal behavior (speed, TH, and deceleration) was recorded starting 5 s before the onset of each scenario and ending when the scenario was over. A scenario was considered to begin when the FCW triggered a warning (or would have triggered a warning for the control group), except in intersection scenarios, in which it was considered to begin when the other vehicle started up. Scenarios ended when the FCW warning light switched off (or would have switched off for the control group) or until the other vehicle was no longer

TABLE 2: Test Scenarios

Test scenario	Description	FCW alarm (for familiarized and unfamiliarized drivers)
1. Intersection	Drivers encountered a vehicle crossing an intersection 3 s away from them.	No alarm
2. Overtaking	Drivers had to pass a truck driving at 70 km/h.	Nuisance alarm (no danger)
3. Turning	Drivers followed a lead vehicle that put on the brakes (3 m/s^2) to turn at an intersection; turn signals were activated 5 s earlier.	Nuisance alarm (no danger because slowing down could be anticipated)
4. Braking	Drivers had to brake behind a lead vehicle that put on the brakes (3 m/s^2).	Useful alarm
5. Emergency braking	Drivers had to brake strongly behind a lead vehicle that slammed on the brakes (5 m/s^2).	Useful alarm

Note. FCW = forward collision warning.

in front of the driver's lane for intersection scenarios. The following behavioral indicators were computed:

- Mean TH, in seconds, measured both for the 5 s before scenario onset and during the scenario (TH = D / Sf).
- Response time (RT), in seconds, measured between scenario onset and the driver's reaction (releasing the gas pedal or braking).
- Frequency of gas-pedal release after warning (RA), as an indicator of warning usefulness, in line with Abe and Richardson (2004, 2006), who consider warnings useful if they occur before the driver takes her or his foot off the gas pedal. This indicator was calculated for FCW users only.
- Maximum deceleration (MD) during the scenario, in meters per second squared, to measure reaction intensity.

Self-report data were gathered after the familiarization and test sessions. We used 7-point scales to measure (a) perceived difficulty handling the driving situation (1 item for each of the five test scenarios); (b) self-assessment of one's own driving on the simulator, which included self-confidence (10 items, Cronbach's α = .91) and perceived self-ability (10 items, Cronbach's α = .97) (Moessenger, Kassaagi, Meyer, Delhomme, & Valot, 2006); (c) system assessment by FCW users (unfamiliarized drivers made a priori judgments), which included trust in the FCW (12 items, Cronbach's α = .88) and perceived system performance (15 items, Cronbach's α = .92) (Moessenger et al., 2006), FCW acceptance (van der Laan, Heino, & De Waard, 1997); and (d) mental workload generated by the FCW and by the distracting task, respectively (measured by the NASA Task Load Index; Hart & Staveland, 1988).

RESULTS AND DISCUSSION

First we present the overall results pertaining to the whole test session (system understanding, workload) and to all scenarios pooled (behavioral data, distracting task performance). Then we describe the results for each scenario (behavioral data and drivers' perceived difficulty in handling each situation). Last, we report the results pertaining to self-assessments and system assessments.

The data were analyzed with the use of nonparametric statistics (χ^2 test, Mann-Whitney U test) and parametric statistics (factorial and repeated-measures ANOVAs, Student's t test). Differences found via post hoc comparisons

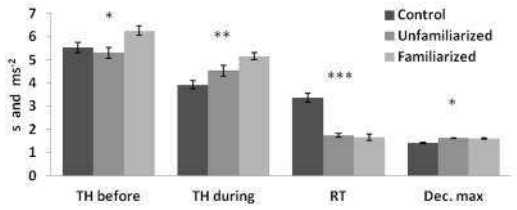


Figure 2. Mean time headway (TH) before or during the scenarios, response time (RT), and maximum deceleration (Dec. max). Bars represent standard error; between-group significance: *$p < .05$, **$p < .01$, ***$p < .001$.

(Tukey's test) are reported when they reached the significance level of $\alpha = .05$.

Overall Results

Familiarized drivers gave more correct answers about system operation than nonfamiliarized drivers did ($M = 2.83$, $SD = 0.98$, and $M = 2.08$, $SD = 0.90$, respectively; Mann-Whitney U, $p < .05$). Thus, active familiarization (i.e., FCW use during the familiarization phase) promoted a better understanding of FCW operation. Significant group differences in driving behavior (see Figure 2) were found for THs before, $F(2, 25) = 3.6$, $p < .05$, $\eta^2 = 0.2$, and during, $F(2, 25) = 5.38$, $p < .01$, $\eta^2 = 0.3$, scenario display; RT, $F(2, 25) = 42.28$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.8$; and deceleration, $F(2, 25) = 4.49$, $p < .025$, $\eta^2 = 0.3$. Post hoc tests indicated that active familiarization helped drivers adopt safer behavior: Familiarized drivers maintained longer THs before and during scenarios than unfamiliarized and control drivers did. FCW users (familiarized and unfamiliarized) reacted faster and decelerated more than control drivers did.

Longer THs were not limited to the scenario periods. Familiarized participants also received fewer warnings when no scenario was occurring, that is, they tailgated less often than did the unfamiliarized and control drivers, $\chi^2(1) = 4.82$, $p < .05$, and $\chi^2(1) = 6.66$, $p < .025$, respectively. This behavior resulted in safer driving: No familiarized driver had a collision during the experiment, whereas 20% of the unfamiliarized and 40% of the controls did. Familiarized drivers tended to have fewer collisions than controls, $\chi^2(1) = 3.66$, $p = .056$.

The findings for distracting-task performance, as well as for the mental workload of the distracting task and of FCW use, are presented in Table 3. The high error rate of unfamiliarized drivers on the secondary task as compared with familiarized ($p < .05$) and control drivers ($p < .05$) can be attributed to the fact that unfamiliarized drivers discovered the FCW only in the test session and probably allocated more attention to monitoring the device than responding to the distracting task. This may also explain the higher mental workload on the secondary task reported by unfamiliarized drivers as compared with familiarized drivers ($p < .05$).

Scenario Results

Emergency braking scenario. Significant group differences (see Figure 3) were found for THs before, $F(2, 25) = 3.94$, $p < .05$, $\eta^2 = .25$, and during, $F(2, 22) = 4.99$, $p < .01$, $\eta^2 = .3$, scenario display; for RT, $F(2, 22) = 10.12$, $p < .001$, $\eta^2 = .45$; and for deceleration, $F(2, 22) = 3.67$, $p < .05$, $\eta^2 = .25$. Post hoc analyses showed that FCW users reacted faster than control drivers did. Furthermore, 100% of the familiarized and 82% of unfamiliarized drivers released the gas pedal after the warning was displayed, which means that the warning was useful. Active familiarization promoted safer behavior and more efficient reactions: Familiarized drivers maintained longer THs than did other drivers before scenario onset; they also maintained longer THs during braking than the other drivers and did not brake as strongly as the controls. Their greater TH before scenario onset explains why familiarized drivers were better at avoiding collisions. The fact that they did not slam on the brakes suggests that their reaction was well suited to the situation. After the experiment, the familiarized ($M = 3.33$, $SD = 0.81$) and unfamiliarized ($M = 3.66$, $SD = 1.43$) drivers rated the emergency braking scenario as easier to handle than the controls did ($M = 2.1$, $SD = 0.99$), $t(14) = 2.55$, $p < .025$, and $t(20) = 2.91$, $p < .008$, respectively.

Braking scenarios. Significant differences between groups (see Figure 4) showed up on THs before, $F(2, 25) = 3.05$, $p < .05$, $\eta^2 = .2$, and during, $F(2, 25) = 2.97$, $p = .07$, $\eta^2 = .2$, scenarios as well as on RT, $F(2, 25) = 28.37$, $p <$

TABLE 3: Mean Distracting-Task Performance (Percentage of Mislocations and Number of Tasks Correctly Solved per Participant) and Mental Workload of the Distracting Task and of FCW Use

Driver group	Error rate, secondary task	Tasks correctly solved, secondary task	Workload, secondary task	Workload, FCW use
Control	0.6 (0.08)	80.3 (17.4)	3.56 (1.05)	
Unfamiliarized	4.1 (0.20)	76.4 (33.3)	4.11 (0.74)	2.66 (1.31)
Familiarized	1.3 (0.11)	81.0 (16.4)	3.13 (0.88)	3.25 (1.41)
p	.04	*ns*	.02	.001

Note. FCW = forward collision warning; *p* indicates between-group significance; values in parentheses represent standard error.

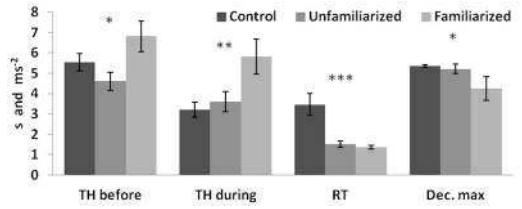


Figure 3. Mean time headway (TH) before or during emergency braking scenarios, response time (RT), and maximum deceleration (Dec. max). Bars represent standard error; between-group significance: **p* < .05, ***p* < .01, ****p* < .001.

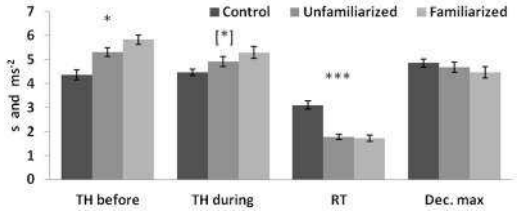


Figure 4. Mean time headway (TH) before or during braking scenarios, response time (RT), and maximum deceleration (Dec. max). Bars represent standard error; between-group significance: **p* < .10, ***p* < .05, ****p* < .001.

.001, $\eta^2 = .7$. Post hoc comparisons indicated no differences between familiarized and unfamiliarized drivers, but their behavior differed significantly from controls: FCW users adopted longer THs than controls before and during scenarios and reacted faster to a warning. Virtually all FCW users (89% of familiarized and 84% of unfamiliarized drivers) released the gas pedal after a warning, which means that the warning was truly useful in these scenarios. There was no group difference in the postexperimental ratings of difficulty handling the braking scenarios. For these scenarios, active familiarization did not offer an advantage, which is not surprising because the purpose of an FCW is precisely to help drivers avoid collisions in such situations.

Turning scenarios. Unexpectedly, the warnings were apparently useful in the turning scenarios, such that 83% of FCW users released the gas pedal after perceiving the warning. An assumption is that the distracting task made it difficult to detect the leading vehicle's turn signal. The only significant group difference pertained to RT, $F(2, 24) = 11$, $p < .001$, $\eta^2 = .5$: FCW users ($M = 1.8$, $SD = 0.24$, and $M = 2.2$, $SD = 0.11$, for familiarized and unfamiliarized drivers, respectively) reacted faster than the controls did ($M = 4.6$, $SD = 0.78$). There was no group difference in the task difficulty ratings.

Overtaking scenarios. The three groups differed significantly only on RT, $F(2, 21) = 15.85$, $p < .001$, $\eta^2 = .6$: FCW users ($M = 1.3$, $SD = 0.16$, and $M = 2.4$, $SD = 0.76$, for familiarized and unfamiliarized drivers, respectively) reacted much faster than did controls ($M = 11.3$, $SD = 1.95$). Further analysis showed that the warning stayed on for an average of 6.53 s and 6.06 s for the FCW users, whereas it would have stayed on for 15.77 s for controls. Likewise, the minimum TH during the scenarios was shorter for controls ($M = 1.21$, $SD = 0.42$) than for unfamiliarized ($M = 2.57$,

$SD = 0.91$) and familiarized ($M = 2.62$, $SD = 0.83$) drivers, $F(2, 25) = 5.51$, $p < .01$, $\eta^2 = .3$. There was no difference in the ratings of overtaking difficulty.

These results suggest that the different groups of drivers overtook the other vehicles in the same way but in a different amount of time. The minimum TH maintained indicates that FCW users initiated the maneuver much faster. Hurrying to pass another car has a potentially negative impact on safety, since it shortens the time available for perceiving the surrounding traffic (e.g., Wilson & Best, 1982). It thus seems that when the FCW system signaled a danger zone, it prompted the drivers to quickly get out from behind the vehicle they were about to pass. Active familiarization did not prevent this behavior.

Intersection scenarios. None of the behavioral indicators revealed any significant differences between the three driver groups. After the test, familiarized drivers ($M = 4$, $SD = 1.24$) and unfamiliarized drivers ($M = 4.04$, $SD = 1.67$) tended to judge the intersection scenarios as easier to handle than did the controls ($M = 2.7$, $SD = 1.17$), $t(14) = 1.98$, $p = .067$, and $t(16) = 1.94$, $p = .069$, respectively. We can assume that FCW users were more on the alert for vehicles crossing in front of their lane at intersections because the manual specifically mentioned this situation and attracted their attention to the lack of warnings in this case.

Self-Assessment and System Assessment

Self-assessment. Most of the warnings triggered during the experiment turned out to be useful. Accordingly, familiarized ($M = 4.0$, $SD = 1.2$) and unfamiliarized ($M = 3.8$, $SD = 1.0$) drivers tended to rate the situations as easier to handle than controls did ($M = 2.7$, $SD = 1.2$), $t(14) = 2.01$, $p = .063$, and $t(20) = 2.84$, $p < .01$, respectively. However, familiarized drivers said they had less self-confidence when driving on the simulator than did the unfamiliarized and controls, both after familiarization, $t(14) = 3.24$, $p < .01$, and $t(15) = 2.16$, $p < .05$, respectively, and after the test, $t(14) = 2.39$, $p < .05$, and $t(15) = 2$, $p = .063$, respectively (see Table 4). They also gave lower ratings for their driving ability on the simulator, both after familiarization, $t(14) = 3.44$, $p < .01$, and $t(15) = 3.33$, $p = .051$, respectively, and after the test, $t(14) = 3.31$, $p < .01$, and $t(15) = 2.61$, $p < .025$, respectively.

Active familiarization clearly lowered the participants' self-assessments about driving on the simulator. There are several possible reasons for this result. In line with Jamson and Merat (2005), we can assume that learning how to use an FCW is an additional task that makes driving more difficult and makes drivers feel they are driving poorly, especially since the familiarized drivers never drove without the FCW. This group may therefore have had trouble differentiating between their simulator-driving ability and their FCW-driving ability. Furthermore, as Ivancic and Hesketh (2000) showed, "error training," that is, putting drivers in a situation in which it is very difficult to avoid a collision, improves driving performance but also considerably reduces drivers' confidence in their skills. Active familiarization in no-warning or useless-warning situations can be likened to "system-generated error training," which makes driver-system interactions more effective while also decreasing confidence in one's own skills.

It could be that the familiarized drivers' safer behavior resulted from their lower self-ratings about their simulator-driving ability rather than from the active familiarization per se. However, several findings suggest that this was not the case. First, the familiarized drivers did not say that managing the scenarios was more difficult than the unfamiliarized drivers did. The lower self-assessments about simulator driving therefore do not seem to be linked to perceived difficulty handling the driving situations. Second, active familiarization decreased the mental workload, as shown by the smaller mental-workload ratings, $t(15) = 2.33$, $p < .05$, and lower error rate, $F(2, 25) = 4.53$, $p < .025$, $\eta^2 = .3$, of familiarized drivers as compared with unfamiliarized ones on the distracting task (see Table 3). Lower self-ratings about simulator driving are incompatible with this effect.

System assessment. After familiarization, that is, after having experienced the critical situations or having simply read a written description, there was no difference in the participants' trust in the FCW, its perceived performance, or its acceptance

TABLE 4: Mean Self-Confidence and Self-Ability Ratings for Driving on the Simulator After Familiarization (fam.) and After the Test (test)

Driver group	Self-confidence fam.	Self-confidence test	Self-ability fam.	Self-ability test
Control	6.5 (0.7)	6.58 (0.73)	5.5 (0.84)	5.5 (0.84)
Unfamiliarized	5.8 (0.9)	6 (0.89)	4.83 (0.93)	4.97 (0.83)
Familiarized	4.83 (0.98)	4.83 (1.32)	3.83 (1.16)	3.71 (1.17)
p	.005; .046	.041; .063	.004; .051	.005; .02

Note. The *p* values indicate between-group significance for familiarized versus control drivers, and familiarized versus unfamiliarized drivers, respectively; values in parentheses represent standard error.

level (Table 5). After the experiment, as expected, the familiarized drivers tended to trust the FCW more than did the unfamiliarized drivers, $t(15) = 1.86$, $p = .08$. The same tendency was observed for perceived performance, $t(15) = 2.01$, $p = .063$. In agreement with Muir (1994), we suggest that this tendency results from a better understanding of the FCW and more effective driver-system interactions.

However, it is surprising that FCW acceptance did not rise as trust in the FCW rose. The utility and satisfaction scores were similar for the familiarized and unfamiliarized drivers after the familiarization and test phases. Utility was always greater than satisfaction, $F(3, 45) = 19.79$, $p < .001$, $\eta^2 = .6$. The failure of FCW acceptance to rise with trust is probably attributable to the high frequency of our warnings (approximately one every 3 min), which is undoubtedly beyond the acceptable tolerance level for automobile drivers. Most of the warnings turned out to be useful, in addition to the fact that the drivers were continuously being distracted by the secondary task whenever a danger arose. As a whole, then, the various warnings had comparable degrees of relevance and utility, no matter how well the drivers understood the system and interacted with it. Finally, the factors we used to match the groups (preferential TH, sensation seeking, and age) may be linked to trust and acceptance, which could account for why the ratings were similar across groups.

CONCLUSIONS

The present study validated the hypothesis that FCW familiarization on a simulator involving situations with absent or useless warnings has a beneficial effect: It clearly increased the familiarized drivers' understanding of the system and made it seem more trustworthy. Driver-system interactions improved among familiarized drivers, who adopted longer headways and exhibited safer behaviors, especially in emergency braking situations. Remarkably, no familiarized driver had a collision, contrary to 20% of the unfamiliarized drivers and 40% of the control drivers.

Despite these obvious benefits, the method of familiarization implemented in the present study ended up lowering drivers' confidence in their driving skills. This unexpected effect may come from their insufficient mastery of the driving simulator. It is true that simulator driving is costly in terms of attentional resources and also requires a certain amount of adaptation time (e.g., Gopher, Weil, & Bareket, 1994). Accordingly, our research suggests that the drivers' perceived difficulty might have had a negative impact on their assessments of the system. We can assume that more extensive familiarization with the simulator could help drivers learn more about how an FCW operates and better distinguish their simulator-driving ability from the FCW-driving ability.

In spite of these limitations, this study demonstrates the undeniable usefulness of FCW training. It suggests that a familiarization period offering drivers the chance to experiment with an FCW could help them learn to use this complex system properly. Future research should attempt to determine how realistic a simulator has to be to achieve effective familiarization. It would also be worthwhile to test familiarization effectiveness in real-world conditions to ensure ecological validity and result transferability.

The familiarization method used in the present study could certainly be improved. We saw that our familiarization sessions did not prevent drivers from hurrying through their overtaking

TABLE 5: Mean Trust Ratings, Perceived System Performance, and Acceptance Scale Score After Familiarization (fam.) and After the Test (test)

Driver group	Trust fam.	Trust test	Perfor-mance fam.	Perfor-mance test	Utility fam.[a]	Utility test[a]	Satisfac-tion fam.[a]	Satisfac-tion test[a]
Unfamiliarized	5.0 (1.0)	5.3 (1.1)	3.8 (0.6)	4.9 (1.4)	–.7 (.2)	.79 (.2)	–.57 (.2)	.29 (.2)
Familiarized	5.2 (1.3)	6.3 (0.9)	4.0 (0.4)	6.2 (0.4)	–.6 (.3)	.66 (.2)	–.77 (.3)	.16 (.3)
p	*ns*	.08	*ns*	.063	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*

Note. The *p* value indicates between-group significance; values in parentheses represent standard error.
[a]Acceptance Scale (van der Laan, Heino, & De Waard, 1997).

maneuvers, a potentially dangerous behavior from the road-safety standpoint. Note that the literature on this topic insists on the necessity of eliminating a large number of warnings, particularly in the overtaking and lane-changing situations (e.g., LeBlanc et al., 2008; Smith, Bakowski, & Witt, 2008). Warnings in these situations are likely to disturb the driver because the mental workload is great, added to the fact that minimum THs are often short, whereas the risk of collision is rarely high. Rather than attempting to improve drivers' understanding of the system in these cases, one approach could be to eliminate the warnings whenever the driver's turn signal is on.

In conclusion, FCW familiarization on a driving simulator seems to be a promising avenue for improving the use of such systems. Other studies need to be conducted on simulator validity and on the problem of raising drivers' FCW acceptance.

ACKNOWLEDGMENTS

This study is part of the French research project "MATISS" funded by the French automobile cluster MOVE'O and the French Ministry of Industry. We would like to thank the staff of Renault automobile manufacturers for their help and participation and the staff of OKTAL Company for their technical support. We are particularly grateful to Denis Courtot for his assistance and Vivian Waltz for the translation into English.

KEY POINTS

- This study assessed the effects of familiarization with a forward collision warning system on a driving simulator.
- Familiarization promoted a better understanding of how the system works.
- Familiarization promoted safer behavior, which translated into a greater ability to avoid collisions and to maintain significantly longer time headways.
- Familiarization had a tendency to increase trust in the FCW system but did not affect FCW acceptance by drivers.
- Familiarization did not eliminate potentially risky behaviors when overtaking another vehicle or when a vehicle was merging into their lane.
- Familiarization decreased self-confidence and perceived self-ability to drive on the simulator.

REFERENCES

Abe, G., Itoh, M., & Tanaka, K. (2002, July). *Dynamics of drivers' trust in warning systems.* Paper presented at the 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain.

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, 7*, 307–322.

Abe, G., & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics, 37*, 577–586.

Breznitz, S. (1984). *Cry-wolf: The psychology of false alarms*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Cahour, B., & Forzy, F.-J. (2009). Does projection into use improve trust and exploration? An example with a cruise control system. *Safety Science, 47*, 1260–1270.

Campbell, B. N., Smith, J. D., & Najm, W. G. (2003). *Examination of crash contributing factors using national crash databases* (No. DOT HS 809 664). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Campbell, J. L., Everson, J. H., Garnes, S. A., Pittenger, J. L., Kennedy, J., & Llaneras, E. (1998). *Preliminary human factors review for the Intelligent Vehicle Initiative (IVI) Program: Identification of human factors research needs*. Seattle, WA: Battelle Seattle Research Center.

Carton, S., Jouvent, R., & Wildlöcher, D. (1992). Cross-cultural validity of Sensation Seeking Scale: Development of a French abbreviated form. *European Psychiatry, 7*, 225–234.

Cotté, N., Meyer, J., & Coughlin, J. F. (2001). Older and younger drivers' reliance on collision warning systems. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual*

Meeting (pp. 277–280). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

Dingus, T. A., MacGehee, D. V., Manakkal, N., Jahns, S. K., Carney, C., & Hankey, J. M. (1997). Human factor field evaluation of automotive headway maintenance/collision warning devices. *Human Factors, 39*, 216–229.

Dzindolet, M. T., Pierce, L. G., Beck, H. P., & Dawe, L. A. (2002). The perceived utility of human and automated aids in a visual detection task. *Human Factors, 44*, 79–94.

Farber, E., & Paley, M. (1993). *Using freeway traffic data to estimate the effectiveness of rear-end collision countermeasures* (pp. 260–268). Proceedings of the 3rd Annual IVHS America Meeting, Washington, DC.

General Motors. (2005). *Automotive Collision Avoidance System Field Operational Test (ACAS FOT)* (Final Program Report No. DOT HS 809 886). Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Gopher, D., Weil, M., & Bareket, T. (1994). Transfer of skill from a computer game trainer to flight. *Human Factors, 36*, 387–405.

Graham, R. (1999). Use of auditory icons as emergency warnings: Evaluation within a vehicle collision avoidance application. *Ergonomics, 42*, 1233–1248.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). *Development of a NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research*. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload* (pp. 139–183). Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Heino, A., van der Molen, H. H., & Wilde, G. J. S. (1992). *Risk homeostasis process in car following behaviour: Individual differences in car-following perceived risk* (No. VK 92-02). Groningen, Netherlands: Rijksuniversiteit.

Horowitz, A. D., & Dingus, T. A. (1992). Warning signal design: A key human factors issue in an in-vehicle front-to-rear-end collision warning system. *Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting* (pp. 1011–1013). Santa Monica, CA: Human Factors Society.

Ivancic, K., & Hesketh, B. (2000). Learning from errors in a driving simulation: Effects on driving skill and self-confidence. *Ergonomics, 43*, 1966–1984.

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, 16*, 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, 8*, 79–96.

Knipling, R., Wang, J.-S., & Yin, H.-M. (1993). *Rear-end crashes: Problem size assessment and statistical description* (No. DOT HS 807 994). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

LeBlanc, D. J., Eby, D. W., Bareket, Z., & Vivoda, J. M. (2008). *On-road evaluation of the SAVE-IT vehicle prototype: Task 14C.* Final report of the SAVE-IT Project (Vol. 1). Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.

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, 44*, 214–334.

Lees, M. N., & Lee, J. D. (2007). The influence of distraction and driving context on driver response to imperfect collision warning systems. *Ergonomics, 50*, 1264–1286.

Lerner, N. D., Kotwal, B., Lyons, R., & Gardner-Bonueau, D. (1996). *Preliminary human factors guidelines for crash avoidance warning devices* (No. DOT HS 808 342). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Maltz, M., & Shinar, D. (2007). Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid distracted drivers. *Transportation Research Part F, 10*, 345–357.

Moessinger, M., Kassaagi, M., Meyer, T., Delhomme, P., & Valot, C. (2006). *Attitude et dynamique de la confiance dans les alertes et les assistances à la conduite (ADAAC)* [Attitude and dynamics of trust in driver warning and assistance systems] (Research Report Prédit 3 GO3). Nanterre, France: LAB.

Muir, B. M. (1994). Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics, 37*, 1905–1922.

Najm, W. G., Smith, J. D., & Yanagisawa, M. (2007). *Pre-crash scenario typology for crash avoidance research* (No. DOT HS 810 767). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: Empirical studies and quantitative models. *Ergonomics, 43*, 931–951.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, and abuse. *Human Factors, 39*, 230–253.

Petzoldt, T., Bär, N., Ihle, C., & Krems, J. (2011). Learning effects in the lane change task (LCT): Evidence from two experimental studies. *Transportation Research Part F, 14*, 1–12.

Regan, M., Triggs, T. J., Young, K. L., Tomasevic, N., Mitsopoulos, E., Stephan, K., & Tingvall, C. (2006). *On-road evaluation of intelligent speed adaptation, following distance warning and seatbelt reminder systems: Final results of the Australian TAC SafeCar project*. Melbourne, Australia: Monash University Accident Research Centre.

Reymond, G., & Kemeny, A. (2000). Motion cueing in the Renault driving simulator. *Vehicle System Dynamics, 34*, 249–259.

Smith, M. R. H., Bakowski, D. L., & Witt, G. J. (2008). *A final report of Safety Vehicles Using Adaptive Interface Technology, Phase II: Task 9C. Adaptive safety warning countermeasures*. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute.

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, 5*, 1–10.

Wang, J., Knipling, R., & Goodman, M. (1996). The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 crashworthiness data system. Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association for the Advancement of Automotive Medicine (pp. 377–392), Vancouver, Canada.

Wilson, T., & Best, W. (1982). Driving strategies in overtaking. *Accident Analysis and Prevention, 14*, 179–185.

Wilson, T., Butler, W., McGehee, D., & Dingus, T. A. (1997). Forward-looking collision warning system performance guidelines. SAE technical Paper 970456.

Wilson, T., Miller, S., Burns, M., Chase, C., Taylor, D., Butler, W., McGehee, D., & Dingus, T. (1998). *Light vehicle forward-looking, rear-end collision warning system performance guidelines* (No. DOT HS 808 948). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Zador, P. L., Krawchunk, S. A., & Vaos, R. B. (2000). *Automotive collision avoidance (ACAS) program: Final report*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Arnaud Koustanaï received his PhD in psychology in 2005 from the University of Provence in Aix-en-Provence, France. He is a project manager at the Vision Institute in Paris.

Viola Cavallo received her PhD in psychology in 1982 from the University of Provence in Aix-en-Provence, France. She is a senior researcher for the Laboratory of Driver Psychology at Ifsttar (French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks).

Patricia Delhomme received her PhD in psychology in 1987 from the Paris 7 Diderot University, Social Psychology Lab/CNRS, France. She is the head of the Laboratory of Driver Psychology at Ifsttar (French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks).

Arnaud Mas received his MSc in numerical engineering in 2008 from Arts et Métiers Paristech, France. He is a PhD student in virtual reality at Renault and at Arts et Métiers Paristech.

Date received: December 17, 2010
Date accepted: February 1, 2012

A.4 **Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, IN.**

LATERAL CONTROL ASSISTANCE AND DRIVER BEHAVIOR IN EMERGENCY SITUATIONS

Arnaud MAS
PhD Student, Arts et Metiers ParisTech, CNRS, Le2i, Renault Center for Simulation
e-mail: arnaud.mas@renault.com

Frédéric MERIENNE
Professor, Arts et Metiers ParisTech, CNRS, Le2i
e-mail: frederic.merienne@ensam.eu

Andras KEMENY
Department Manager, Renault Center for Simulation
Associate Professor, Arts et Metiers ParisTech, CNRS, Le2i
e-mail: andras.kemeny@renault.com

Submitted to the 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, September 14-16, 2011, Indianapolis, USA

ABSTRACT

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are designed to help drivers improve driving safety. However, automation modifying the way drivers interact with their vehicle, it is important to avoid negative safety impacts. In particular, the change in drivers' behavior introduced by ADAS in situations they are not designed for, should be carefully examined. We carried out an experiment on a driving simulator to study drivers' reaction in an obstacle avoidance situation, when using a lateral control assistance system. A detailed analysis of the avoidance maneuver is presented. Results show that assisted and non-assisted drivers equally succeeded in avoiding the obstacle. However, further analyses tend to show an influence of the assistance system on drivers' first reaction.

Keywords: driving simulation, advanced driver assistance systems, lane departure warning, lane keeping assistant, obstacle avoidance

INTRODUCTION

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are designed to help drivers perform certain tasks, in order to improve driving safety. Nevertheless, automation modifies the way drivers interact with their vehicle, and the resulting safety effects can be different from those expected (Evans, 2004).

In several studies, the concept of levels of automation (LOAs) has been developed to categorize the degree of interaction between humans and machines, from fully manual mode to fully automatic mode (Sheridan and Verplanck, 1978; Endsley and Kaber, 1999; Parasuraman et al., 2000). Another classification was proposed for the more specific case of ADAS (Hoc et al., 2009), defining four main cooperation modes: perception mode, mutual control mode, function delegation mode and fully automatic mode.

Human-centered automation aims at finding the most efficient LOA for a given task. Indeed, high LOAs do not necessarily imply a better performance, as the human operator can experience difficulties to take over control when needed (Kaber and Endsley, 2004), mainly because of excessive trust (Parasuraman and Riley, 1997).

Therefore, it is of particular interest to study drivers' behavior with ADAS in situations where these systems do not provide support (Saad, 2006). However, although many studies investigated ADAS failure situations (Ben-Yaacov et al., 2002; Sullivan et al., 2008; Deborne et al., 2008), less attention has been paid to emergency situations ADAS are not designed for.

A few authors studied emergency braking with longitudinal control assistance systems: Koustanaï et al. (2010) observed, on a driving simulator, less collisions with the leading vehicle among drivers using a forward collision warning system than among drivers using no assistance. On the other hand, Nilsson (1995) observed, on a driving simulator and in a similar situation, more collisions with an adaptive cruise control than without assistance. For lateral control assistance systems (LCAS), Hoc et al. (2006) observed, on a real test track, difficulties to take over control in order to avoid an obstacle, while driving with LCAS using function delegation mode, but no clear effect while driving with LCAS using mutual control mode. However, the authors pointed out that, despite a seeming ecological validity, the test track method had too much safety and technical constraints, and that studies on a driving simulator where needed.

Consequently, we used a driving simulator to investigate how drivers using LCAS react in an emergency situation requiring manual lateral control. Since a LOA effect tends to emerge from the presented studies, we compared two different LCAS illustrating two different LOAs. However, the previously described effects refer to a change in drivers' behavior due to previous training with LCAS, but it must be noted that LCAS could also influence drivers' reaction through a disturbance due to LCAS triggering during the emergency situation. Thus, the origin of the observed effects will be examined and discussed.

METHOD

Apparatus

An experiment was conducted on a fixed-base simulator at Renault Technical Center for Simulation (Guyancourt, France). The simulator is composed of a fully instrumented Renault Scenic car, equipped with an automatic gearbox. The visual scene is displayed on a cylindrical screen via three video projectors, providing a 210° horizontal and 35° vertical field of view. The simulation is handled by Oktal SCANeR© II software (www.scanersimulation.com) and MADA, the Renault proprietary vehicle dynamics model.

Two different LCAS were compared, illustrating two different levels of automation. The Lane Departure Warning (LDW) only generates an oscillation on the steering wheel when the vehicle lateral position exceeds 85 cm. The torque applied on the steering wheel is 2 N in the direction of the lane center, and 0.5 N in the direction of the lane departure, with a period of 300 ms (Navarro et al., 2010).

On the contrary, the Lane Keeping Assistant (LKA) actually contributes to the steering task, by applying on the steering wheel a torque inversely proportional to the vehicle lateral position. The maximum torque delivered, when the vehicle is on the lane border, is approximately 2 N. However, the torque delivered by the LKA is not sufficient to steer automatically, and drivers' action on the steering wheel is still necessary.

Both LCAS use two different sub-modes of mutual control mode, as defined by Hoc et al. (2009). LDW uses action suggestion mode, which delivers a warning using haptic modality, whereas LKA uses limit mode, which opposes a resistance to drivers' action and is more intrusive into the control of the vehicle.

Both LCAS were active only above 50 km/h, and were deactivated when the turn signal was activated, to prevent from a negative interference for voluntary lane departures.

In order to distract them and to make them trigger the LCAS, subjects had to perform a distractive task while driving. The distractive task, known as the surrogate reference task (Mattes and Hallén, 2009; Petzoldt et al., 2011), consisted in locating a target circle (190 mm in diameter, 4 mm in thickness) among 65 distracters (150 mm in diameter, 5 mm in thickness) displayed on a side screen. The participants selected the target zone by moving a cursor using a little keyboard. A new task started 15 seconds after the last movement of the cursor. Subjects were asked to perform the new task as fast as possible after it appeared, but to always give the priority to driving safety. Figure 1 illustrates the simulator setup.



Figure 1 Simulator setup, showing the distractive task on the right

Participants

The 27 participants in this experiment (23 men, 4 women) were all employees at Renault. They had a mean age of 36.2 years old (SD = 10), a valid French driving license for 17 years on average (SD = 10.2; min = 3), and were not expert pilots. Their mean annual traveled distance was 18519 km (SD = 13420). All subjects had normal or corrected-to-normal vision.

Procedure

Subjects drove on an itinerary of approximately 14 km on a dual-lane country road. They were instructed to drive naturally, and to respect the traffic law (speed limit was 90 km/h, 70 km/h in curves). Oncoming traffic was present, in order to prompt drivers to stay in their lane.

The experiment consisted in two driving sessions: a familiarization drive and a test drive. Each drive lasted approximately 13 minutes. During the familiarization drive, subjects drove without LCAS, in order to get used to the simulator and the distractive task. Then, they were divided into three groups: Control, LDW and LKA. During the test drive, subjects from Control group remained without LCAS, whereas subjects from LDW and LKA groups used their respective LCAS.

At the end of the test drive, subjects encountered an emergency situation: a truck was parked on the right side of the road. The truck was placed at the end of a curve to the right, and behind a tree row, so that subjects saw it at the last moment. No oncoming traffic was present in this area, to allow subjects to overtake. The event occurred only once in order to keep the surprise effect.

DATA ANALYSIS

Normal Driving

To evaluate the benefits of LCAS, lane keeping was assessed on two different parts of the itinerary: a curve (length = 727 m; curvature radius = 244 m) and a straight line (length = 416 m). The line integral of the lateral position (LILP) of the subject's vehicle along the right lane center was computed for each group. The LILP corresponds to the area between the lane center and the vehicle trajectory along an itinerary, thus representing the quantity of lane departure on this itinerary. One-way analyses of variance (ANOVAs) were performed (or Kruskal-Wallis tests when ANOVA conditions were not satisfied), with group as independent variable, and LILP as dependent variable.

A second analysis was performed on LILP in the curve, in order to investigate if the observed difference was due to a better lane keeping with LCAS, or to subjects from Control group cutting more the curve. LILP was then split into left-LILP (LILP for lateral positions on the left of the lane center) and right-LILP (LILP for lateral positions on the right of the lane center). ANOVAs were similarly performed on left-LILP and right-LILP.

Emergency Situation

Figure 2 represents a typical avoidance maneuver, which we split into three phases. Firstly, drivers reacted quickly by applying a fast correction on the steering wheel to avoid the obstacle (between t0 and t1). Secondly, drivers applied a correction on the steering wheel in the opposite direction (between t1 and t2). Finally, drivers arrived in a straight line, and turned the steering wheel back around the central position and stabilized on the right lane (between t2 and t3). The chosen criterion for steering wheel stabilization was that the steering wheel stayed between -5° and +5° (relatively to the central position) for 2 seconds, starting at t3. Those three steps will be referred as phase 1, phase 2 and phase 3.

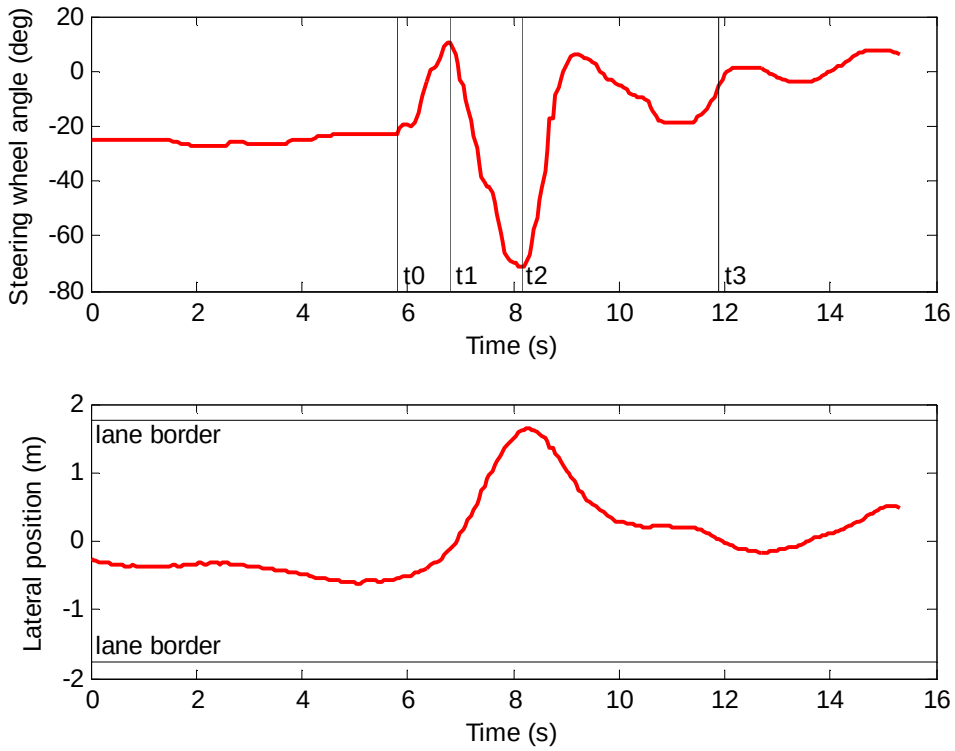


Figure 2 Example of an obstacle avoidance maneuver. Positive values for steering wheel angle and lateral position correspond to steering and lateral deviation to the left.

To better understand the effects of LCAS, the way drivers avoided the obstacle is analyzed, for each group and for each phase. Such a maneuver involves two different control loops. First, drivers react quickly, almost automatically, to the initial situation, using open-loop control. Then, they apply a slower correction depending on the evolution of the environment, using closed-loop control (Michon, 1985). LCAS might influence both control loops, which can be therefore studied separately using the suggested phase splitting. Indeed, we expected that only effects of previous training with LCAS would modify open-loop control, whereas effects of LCAS triggering during the avoidance maneuver would only modify closed-loop control (at $t1$, drivers barely started to deviate from their initial lateral position).

For each phase, we sought to investigate whether subjects adjusted their reaction to the initial situation or to the desired final situation. Therefore, we evaluated the correlation between indicators describing the criticality of the situation at the beginning of the phase, drivers' response, and the goal drivers intended to reach at the end of the phase. This approach is similar to the one proposed by Van Winsum et al. (1999).

During phase 1, the situation was characterized by the obstacle angle, which influences the avoidance maneuver (Fajen and Warren, 2003). It was calculated at $t0$ and $t1$ (and called θ_0 and θ_1, respectively), and corresponds to the direction of the truck in the vehicle frame of reference (see Figure 3). This variable thus defines the level of emergency of the situation: since drivers

had to overtake the truck on the left, a smaller obstacle angle means a more critical situation. Drivers' response to that situation was measured with the steering amplitude δ_1 and the steering duration τ_1. δ_1 corresponds to the difference in steering angle between $t0$ and $t1$, and τ_1 corresponds to the duration of phase 1.

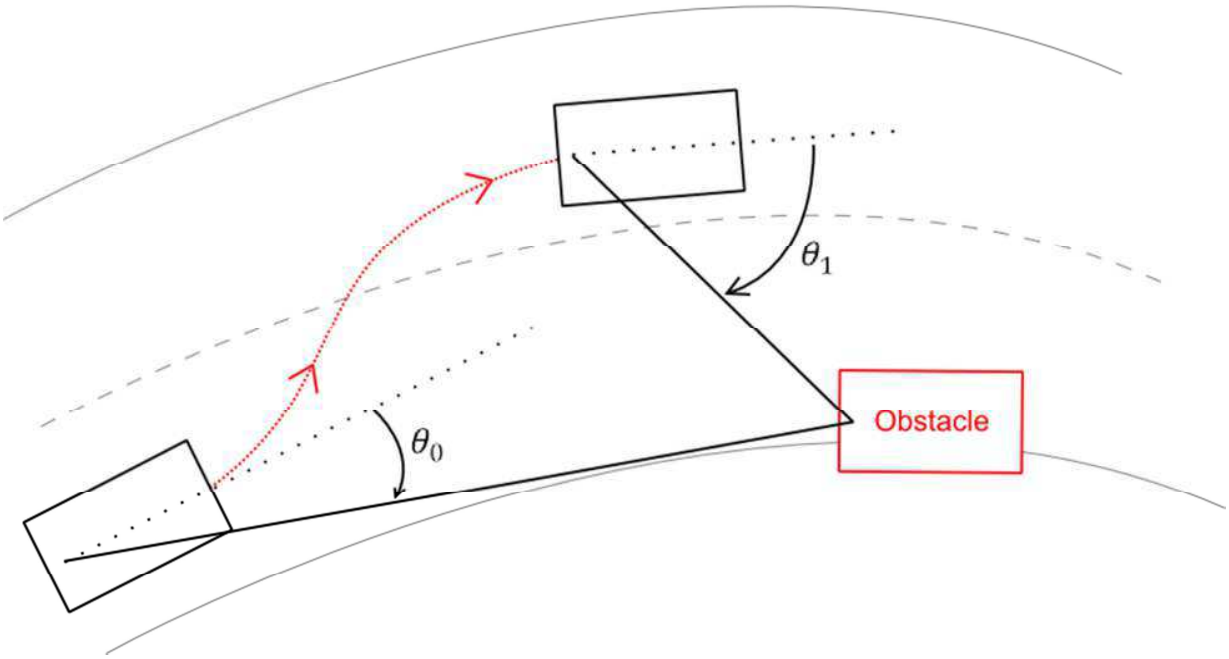


Figure 3 Obstacle angles θ_0 and θ_1. Values are defined with 0 ahead, positive values on the right and negative values on the left.

One-way ANOVAs were performed, with group as independent variable, and δ_1 and τ_1 as dependent variables. Linear regressions were also performed for each group, to explain δ_1 and τ_1 by θ_0, and θ_1 by δ_1 and τ_1.

During phase 2, the situation at $t1$ was characterized by the time to line crossing to the left border of the road (Van Winsum et al., 1999), called TLC_1. Drivers' response was measured with the steering amplitude δ_2 and the steering duration τ_2. The situation at $t2$ was characterized by the lateral position, called LP_2.

One-way ANOVAs were performed, with group as independent variable, and δ_2 and τ_2 as dependent variables. Linear regressions were also performed for each group, to explain δ_2 and τ_2 by TLC_1, and LP_2 by δ_2 and τ_2.

During phase 3, the situation at $t2$ was characterized by the lateral position, called LP_2, and drivers' response with the time to stabilization, called TTS (with the criterion previously described). Thus, TTS corresponds to the duration of phase 3.

A one-way ANOVA was performed, with group as independent variable, and TTS as dependent variable. Linear regressions were also performed for each group, to explain TTS by LP_2.

RESULTS

Groups homogeneity

There were no significant difference of age ($F(2,24) = 0.13$; $p = 0.88$) nor gender ($\chi^2(2) = 0.5$; $p > 0.2$) between groups.

Normal Driving

On the curve, results show no significant effect of the group on the LILP for the familiarization drive ($F(2,24) = 0.09$; $p = 0.92$) and a significant effect for the test drive ($F(2,24) = 3.51$; $p < 0.05$), implying an effect of the presence of LCAS. Post-hoc analysis on the test drive shows that both LDW and LKA groups have a significant different LILP than Control group ($p = 0.04$ and $p = 0.03$, respectively). Those two groups have a smaller LILP than Control group.

There was no significant effect of group on left-LILP ($H(2,27) = 1.85$; $p = 0.4$), nor on right-LILP ($F(2,24) = 1.91$; $p = 0.17$).

On the straight line, there was no significant effect of group on LILP, neither for the familiarization drive ($H(2,27) = 3.52$; $p = 0.17$), nor for the test drive ($H(2,27) = 1.24$; $p = 0.54$).

Emergency Situation

All subjects from all groups succeeded in avoiding the truck. Only one subject from LKA group lost the control of the vehicle after overtaking the truck, and left the road. At $t1$, the peak value of the first steering correction was 4.93° to the left on average (SD = 14.84), and was not significantly different from 0° ($t(26) = 1.73$; $p = 0.1$). Subjects also started to countersteer significantly before the time of their maximal lateral deviation ($t(26) = 28.92$; $p = 0.00$), 1.65 seconds sooner on average (SD = 0.3). θ_0 was 8.23° on average (SD = 1.28).

During phase 1, there was no significant effect of group, neither on δ_1 ($F(2,24) = 0.2$; $p = 0.82$), nor on τ_1 ($F(2,24) = 0.95$; $p = 0.4$).

Table 1 summarizes the regression results on δ_1, which show a significant correlation between θ_0 and δ_1 for LDW and LKA groups, and a significant correlation between δ_1 and θ_1 for Control and LDW groups.

Table 1 Relations between the situation and steering amplitude during phase 1

	Regression of δ_1 on θ_0			Regression of θ_1 on δ_1		
Group	β	p	Adjusted R^2	β	p	Adjusted R^2
Control	-0.425	0.254	0.064	0.737	0.024	0.477
LDW	-0.790	0.011	0.571	0.743	0.022	0.488
LKA	-0.865	0.003	0.713	-0.501	0.169	0.144

We can see from the sign of β coefficients in Table 1 that for LDW and LKA groups, the more on the left the obstacle at $t0$, the bigger the steering amplitude. Similarly, for Control and LDW groups, the bigger the steering amplitude, the more on the right the obstacle at $t1$.

Table 2 summarizes the regression results on τ_1, which show a significant correlation between θ_0 and τ_1 for Control group.

Table 2 Relations between the situation and steering duration during phase 1

	Regression of τ_1 on θ_0			Regression of θ_1 on τ_1		
Group	β	p	Adjusted R^2	β	p	Adjusted R^2
Control	0.719	0.029	0.449	-0.368	0.330	0.012
LDW	-0.187	0.63	~ 0	0.163	0.674	~ 0
LKA	0.292	0.446	~ 0	0.186	0.631	~ 0

For phase 2, there was no significant effect of group, neither on δ_2 ($F(2,24) = 0.58$; $p = 0.57$), nor on τ_2 ($F(2,24) = 1.25$; $p = 0.30$).

Table 3 summarizes the regression results on δ_2, which show a significant correlation between TLC_1 and δ_2 for LDW group.

Table 3 Relations between the situation and steering amplitude during phase 2

	Regression of δ_2 on TLC_1			Regression of LP_2 on δ_2		
Group	β	p	Adjusted R^2	β	p	Adjusted R^2
Control	-0.477	0.195	0.117	-0.628	0.070	0.307
LDW	-0.847	0.004	0.677	0.504	0.166	0.148
LKA	-0.563	0.115	0.212	-0.102	0.794	~ 0

Table 4 summarizes the regression results on τ_2, which show a significant correlation between TLC_1 and τ_2 for all groups.

Table 4 Relations between the situation and steering duration during phase 2

	Regression of τ_2 on TLC_1			Regression of LP_2 on τ_2		
Group	β	p	Adjusted R^2	β	p	Adjusted R^2
Control	0.814	0.008	0.614	0.117	0.764	~ 0
LDW	0.854	0.003	0.69	-0.660	0.053	0.355
LKA	0.76	0.018	0.517	-0.099	0.800	~ 0

For phase 3, there was no significant effect of group on TTS ($F(2,24) = 1.77$; $p = 0.19$). Table 5 summarizes the regression results.

Table 5 Relations between the lateral position and the time to stabilization during phase 3

	Regression of TTS on LP_2		
Group	β	p	Adjusted R^2
Control	-0.504	0.167	0.147
LDW	0.214	0.580	~ 0
LKA	0.253	0.511	~ 0

DISCUSSION

Normal Driving

Results showed that the LILP in the curve was significantly smaller for subjects with LDW and LKA. If this difference was only due to the fact that LCAS prevented subjects from cutting the curve, we expected that all the observed difference would reside in right departures only. However, results showed no significant effect of group on right-LILP. This suggests that the difference in lane departure is balanced between left and right lane departure, thus confirming a real lane keeping improvement with LCAS.

Emergency Situation

Globally, subjects easily managed to avoid the truck. They performed a relatively small steering correction, and countersteered quickly. Indeed, the road curvature allowed them to quickly deviate from their trajectory. Unlike overtaking maneuvers, there was no stabilization on the left lane (Younsi et al., 2009), probably because of the larger speed difference between the vehicles.

Given the results for phase 1, it appears that the reaction of subjects from LDW and LKA groups is mostly determined by the obstacle angle at the beginning of the phase, whereas the reaction of subjects from Control and LDW groups is rather determined by the obstacle angle at the end of the phase, after the steering correction. Therefore, it appears that automation induced more reaction and less anticipation for this phase.

Here, the amplitude of obstacle angle values was pretty limited but, in light of these results, it is likely that more extreme values would lead to a bigger steering amplitude, especially for subjects using LKA. This could cause difficulties to recover the control of the vehicle afterwards. In this experiment, one subject from LKA group lost the control of the vehicle. Although it is not significant, we believe that a more critical situation, with a smaller obstacle angle (by placing the truck more on the left, or increasing the road curvature at the emergency location) could emphasize this effect.

On the contrary, the influence of LCAS during phases 2 and 3 appears to be limited. The observed differences mostly manifested themselves during phase 1. Therefore, these findings suggest that LCAS would mostly influence open-loop control, because of previous training with the systems.

CONCLUSION

In this study, we carried out an experiment on a fixed-base driving simulator, on drivers' reaction in an obstacle avoidance maneuver, when driving with LCAS. The results confirmed the efficiency of LCAS in improving lane keeping in curves, but showed that assisted and non-assisted drivers equally succeeded in avoiding the obstacle.

However, a further examination of the avoidance maneuver gave promising results, suggesting an effect of LCAS in the first phase of the maneuver, which is supposed to involve mainly open-

loop control (Michon, 1985). Indeed, when driving with LCAS, subjects' reaction during that phase was determined by the level of emergency of the initial situation (especially for LCAS with high level of automation). On the other hand, when driving with a LCAS with a lower level of automation, or no LCAS at all, subjects' reaction determined the safety outcome of the final situation. These results suggest an safety impact of LCAS with high level of automation, in more critical emergency situations.

Our findings also tend to show that the influence of LCAS in the emergency situation is more probably a change in drivers' behavior due to previous training with LCAS, than a disturbance due to LCAS triggering during the avoidance maneuver.

Future research will focus on creating new emergency scenarios, in order to emphasize the observed trends. It could include more critical situations, and using a moving-base driving simulator, as its importance for steering behavior has been demonstrated (Kemeny and Panerai, 2003). Such scenarios could be useful in the future, to study drivers' reaction in the early stages of ADAS design.

REFERENCES

Ben-Yaacov, A., Maltz, M., and Shinar, D. (2002). Effects of an in-vehicle collision avoidance warning system on short- and long-term driving performance. *Human Factors*, 44(2), 335-342.

Deborne, R., Barthou, A., Toffin, D., Reymond, G., and Kemeny, A. (2008). Simulation study of driver stress and performance to an unexpected event, in *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 111-120.

Endsley, M. R. and Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-192.

Evans, L. (2004). *Traffic Safety*. Science Serving Society.

Fajen, B. R. and Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstable avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 343-362.

Hoc, J.-M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, E., Netto, M., and Blosseville, J.-M. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: delegation and mutual control. *Le Travail Humain*, 2, 153-182.

Hoc, J.-M., Young, M. S., and Blosseville, J.-M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(2), 135-160.

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

Kemeny, A. and Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31-37.

Koustanaï, A., Cavallo, V., Delhomme, P., and Mas, A. (2010). Familiarization with critical situations when using a forward collision warning: effects on driver-system interactions, in *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 37-47.

Mattes, S. and Hallén, A. (2009). Surrogate distraction measurement techniques: the lane change test, in M. A. Regan, J. D. Lee, and K. L. Young (eds.) *Driver distraction: Theory, Effects and Mitigation*, CRC Press, 107-122.

Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do ?, in L. Evans and R. C. Schwing (eds.) *Human behavior and traffic safety*, New York: Plenum Press, 485-520.

Navarro, J., Mars, F., Forzy, J.-F., El-Jaafari, M., and Hoc, J.-M. (2010). Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 904-912.

Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise controls in critical traffic situations, in *Proceedings of the second World Congress on Intelligent Transport Systems*.

Parasuraman, R. and Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., and Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286-297.

Petzoldt, T., Bär, N., Ihle, C., and Krems, J. F. (2011). Learning effects in the lane change task (LCT)—Evidence from two experimental studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(1), 1-12.

Saad, F. (2006). Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work*, 8(3), 175-181.

Sheridan, T. B. and Verplanck, W. L. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*. Cambridge, MA, MIT Man-Machine Systems Laboratory.

Sullivan, J. M., Tsimhoni, O., and Bogard, S. (2008). Warning reliability and driver performance in naturalistic driving. *Human Factors*, 50(5), 845-852.

Van Winsum, W., De Waard, D., and Brookhuis, K. A. (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(3), 139-149.

Younsi, K., Floris, J., Rajaonah, B., Simon, P., Loslever, P., and Popieul, J.-C. (2009). Study of driver's behavior during overtaking situations, in *International Conference on Road Safety and Simulation*, Paris, France.

A.5 Mas, A., Merienne, F., et Kemeny, A (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in Transportation Studies* RSS2011 Special Issue, 149-158.

Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations

A. Mas[1,2] F. Merienne[2] A. Kemeny[1,2]

[1]*Renault Technical Center for Simulation*
1 avenue du golf, 78280 Guyancourt, France
email: andras.kemeny@renault.com
[2]*Arts et Métiers ParisTech, CNRS, Le2i*
2 rue Thomas Dumorey, 71100 Chalon-sur-Saône, France
email: arnaud.mas-0@etudiants.ensam.fr, frederic.merienne@ensam.eu

Abstract

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are designed to help drivers improve driving safety. However, automation modifying the way drivers interact with their vehicle, it is important to avoid negative safety impacts. In particular, the change in drivers' behavior introduced by ADAS in situations they are not designed for, should be carefully examined. We carried out an experiment on a driving simulator to study drivers' reaction in an obstacle avoidance situation, when using a lateral control assistance system. A detailed analysis of the avoidance maneuver is presented. Results show that assisted and non-assisted drivers equally succeeded in avoiding the obstacle. However, further analyses tend to show an influence of the assistance system on drivers' first reaction.

Keywords – driving simulation, advanced driver assistance systems, lane departure warning, lane keeping assistant, obstacle avoidance

1. Introduction

Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are designed to help drivers perform certain tasks, in order to improve driving safety. Nevertheless, automation modifies the way drivers interact with their vehicle, and the resulting safety effects can be different from those expected [1]. In several studies, the concept of levels of automation (LOAs) has been developed to categorize the degree of interaction between humans and machines, from fully manual mode to fully automatic mode [2]-[4]. Another classification was proposed for the more specific case of ADAS [5], defining four main cooperation modes: perception mode, mutual control mode, function delegation mode and fully automatic mode.

Human-centered automation aims at finding the most efficient LOA for a given task. Indeed, high LOAs do not necessarily imply a better performance, as the human operator can experience difficulties to take over control when needed [6], mainly because of excessive trust [7].

Therefore, it is of particular interest to study drivers' behavior with ADAS in situations where these systems do not provide support [8]. However, although many studies investigated ADAS failure situations [9]-[11], less attention has been paid to emergency situations ADAS are not designed for.

A few authors studied emergency braking with longitudinal control assistance systems: [12] observed, on a driving simulator, less collisions with the leading vehicle among drivers using a forward collision warning system than among drivers using no assistance. On the other hand, [13] observed, on a driving simulator and in a similar situation, more collisions with an adaptive cruise control than without assistance. For lateral control assistance systems (LCAS), [14] observed, on a real test track, difficulties to take over control in order to avoid an obstacle, while driving with LCAS using function delegation mode, but no clear effect while driving with LCAS using mutual control mode. However, the authors pointed out that, despite a seeming ecological validity, the test track method had too much safety and technical constraints, and that studies on a driving simulator where needed.

Consequently, we used a driving simulator to investigate how drivers using LCAS react in an emergency situation requiring manual lateral control. Since a LOA effect tends to emerge from the presented studies, we compared two different LCAS illustrating two different LOAs. However, the previously described effects refer to a change in drivers' behavior due to previous training with LCAS, but it must be noted that LCAS could also influence drivers' reaction through a disturbance due to LCAS triggering during the emergency situation. Thus, the origin of the observed effects will be examined and discussed.

2. Method

2.1. Apparatus

An experiment was conducted on a fixed-base simulator at Renault Technical Center for Simulation (Guyancourt, France). The simulator is composed of a fully instrumented Renault Scenic car, equipped with an automatic gearbox. The visual scene is displayed on a cylindrical screen via three video projectors, providing a 210° horizontal and 35° vertical field of view. The simulation is handled by Oktal SCANeR© II software (www.scanersimulation.com) and MADA, the Renault proprietary vehicle dynamics model.

Two different LCAS were compared, illustrating two different levels of automation. The Lane Departure Warning (LDW) only generates an oscillation on the steering wheel when the vehicle lateral position exceeds 85 cm. The torque applied on the steering wheel is 2 N in the direction of the lane center, and 0.5 N in the direction of the lane departure, with a period of 300 ms [15].

On the contrary, the Lane Keeping Assistant (LKA) actually contributes to the steering task, by applying on the steering wheel a torque inversely proportional to the vehicle lateral position. The maximum torque delivered, when the vehicle is on the lane border, is approximately 2 N. However, the torque delivered by the LKA is not sufficient to steer automatically, and drivers' action on the steering wheel is still necessary.

Both LCAS use two different sub-modes of mutual control mode, as defined by [5]. LDW uses action suggestion mode, which delivers a warning using haptic modality, whereas LKA uses limit mode, which opposes a resistance to drivers' action and is more intrusive into the control of the vehicle.

Both LCAS were active only above 50 km/h, and were deactivated when the turn signal was activated, to prevent from a negative interference for voluntary lane departures.

In order to distract them and to make them trigger the LCAS, subjects had to perform a distractive task while driving. The distractive task, known as the surrogate reference task [16], consisted in locating a target circle (190 mm in diameter, 4 mm in thickness) among 65 distracters (150 mm in diameter, 5 mm in thickness) displayed on a side screen.



Fig. 1 - Simulator setup, showing the distractive task on the right

The participants selected the target zone by moving a cursor using a little keyboard. A new task started 15 seconds after the last movement of the cursor. Subjects were asked to perform the new task as fast as possible after it appeared, but to always give the priority to driving safety. Figure 1 illustrates the simulator setup.

2.2. Participants

The 27 participants in this experiment (23 men, 4 women) were all employees at Renault. They had a mean age of 36.2 years old (SD = 10), a valid French driving license for 17 years on average (SD = 10.2; min = 3), and were not expert pilots. Their mean annual traveled distance was 18519 km (SD = 13420). All subjects had normal or corrected-to-normal vision.

2.3. Procedure

Subjects drove on an itinerary of approximately 14 km on a dual-lane country road. They were instructed to drive naturally, and to respect the traffic law (speed limit was 90 km/h, 70 km/h in curves). Oncoming traffic was present, in order to prompt drivers to stay in their lane.

The experiment consisted in two driving sessions: a familiarization drive and a test drive. Each drive lasted approximately 13 minutes. During the familiarization drive, subjects drove without LCAS, in order to get used to the simulator and the distractive task. Then, they were divided into three groups: Control, LDW and LKA. During the test drive, subjects from Control group remained without LCAS, whereas subjects from LDW and LKA groups used their respective LCAS.

At the end of the test drive, subjects encountered an emergency situation: a truck was parked on the right side of the road. The truck was placed at the end of a curve to the right, and behind a tree row, so that subjects saw it at the last moment. No oncoming traffic was present in this area, to allow subjects to overtake. The event occurred only once in order to keep the surprise effect.

3. Data analysis

3.1. Normal driving

To evaluate the benefits of LCAS, lane keeping was assessed on two different parts of the itinerary: a straight line (length = 416 m) and a curve (length = 727 m; curvature radius = 244 m). The line integral of the lateral position (LILP) of the subject's vehicle along the right lane center was computed for each group.

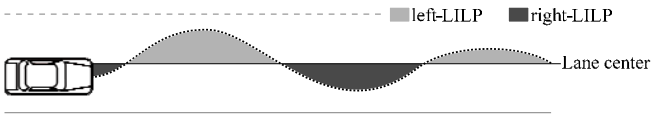


Fig. 2 - Illustration of left-LILP and right-LILP. The dotted line represents the vehicle trajectory

The LILP corresponds to the area between the lane center and the vehicle trajectory along an itinerary, thus representing the quantity of lane departure on this itinerary. For both the straight line and the curve, the LCAS efficiency was assessed with two different tests. First, we performed a one-way analysis of variance (ANOVAs) on the familiarization drive, with group as independent variable and LILP as dependent variable, to account for group discrepancies. Then, we performed a paired Student's t-test for each group, to compare the LILP between the familiarization drive and the test drive. A second analysis was performed on LILP in the curve, in order to investigate if the observed difference affected departure to the left or to the right. LILP was then divided into left-LILP (LILP for lateral positions on the left of the lane center) and right-LILP (LILP for lateral positions on the right of the lane center). Figure 2 illustrates these values. Paired Student's t-tests were similarly performed on left-LILP and right-LILP.

3.2. Emergency situation

Figure 3 represents a typical avoidance maneuver, which we split into three phases. Firstly, drivers reacted quickly by applying a fast correction on the steering wheel to avoid the obstacle (between t_0 and t_1). Secondly, drivers applied a correction on the steering wheel in the opposite direction (between t_1 and t_2). Finally, drivers arrived in a straight line, and turned the steering wheel back around the central position and stabilized on the right lane (between t_2 and t_3). The chosen criterion for steering wheel stabilization was that the steering wheel stayed between -5° and +5° (relatively to the central position) for 2 seconds, starting at t_3. Those three steps will be referred as phase 1, phase 2 and phase 3.

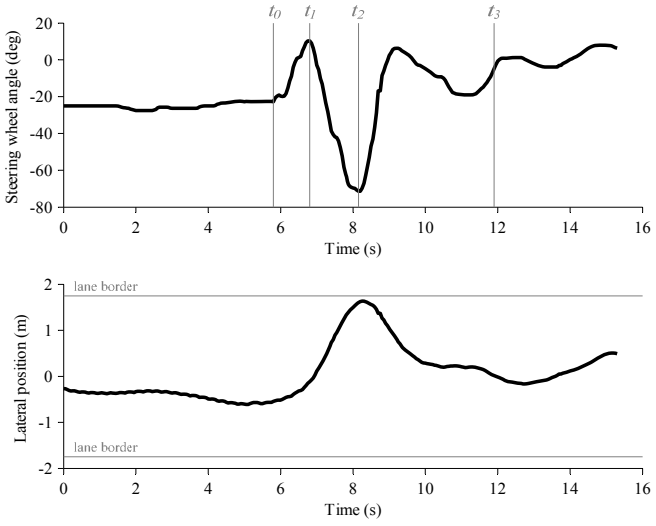


Fig. 3- Example of an obstacle avoidance maneuver. Positive values for steering wheel angle and lateral position correspond to steering and lateral deviation to the left

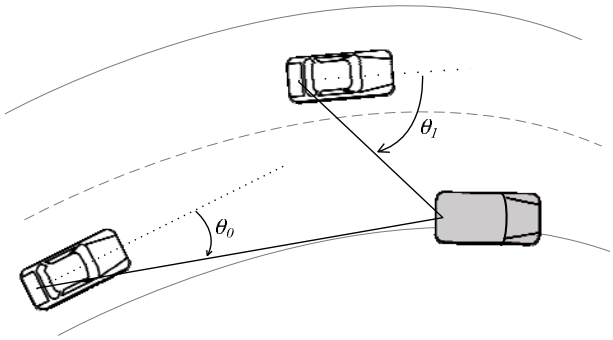


Fig. 4 - Obstacle angles θ_0 and θ_1.
Values are defined with 0 ahead, positive values on the right and negative values on the left

To better understand the effects of LCAS, the way drivers avoided the obstacle is analyzed, for each group and for each phase. Such a maneuver involves two different control loops. First, drivers react quickly, almost automatically, to the initial situation, using open-loop control. Then, they apply a slower correction depending on the evolution of the environment, using closed-loop control [18]. LCAS might influence both control loops, which can be therefore studied separately using the suggested phase splitting.

Indeed, we expected that only effects of previous training with LCAS would modify open-loop control [19], whereas effects of LCAS triggering during the avoidance maneuver would only modify closed-loop control (at t_1, drivers barely started to deviate from their initial lateral position).

For each phase, we sought to investigate whether subjects adjusted their reaction to the initial situation or to the desired final situation. Therefore, we evaluated the correlation between indicators describing the criticality of the situation at the beginning of the phase, drivers' response, and the goal drivers intended to reach at the end of the phase. This approach is similar to the one proposed by [20].

During phase 1, the situation was characterized by the obstacle angle, which influences the avoidance maneuver [21]. It was calculated at t_0 and t_1 (and called θ_0 and θ_1, respectively), and corresponds to the direction of the truck in the vehicle frame of reference (see Figure 4). This variable thus defines the level of emergency of the situation: since drivers had to overtake the truck on the left, a smaller obstacle angle means a more critical situation. Drivers' response to that situation was measured with the steering amplitude δ_1 and the steering duration τ_1. δ_1 corresponds to the difference in steering angle between t_0 and t_1, and τ_1 corresponds to the duration of phase 1.

One-way ANOVAs were performed, with group as independent variable, and δ_1 and τ_1 as dependent variables. Linear regressions were also performed for each group, to explain δ_1 and τ_1 by θ_0, and θ_1 by δ_1 and τ_1.

During phase 2, the situation at t_1 was characterized by the time to line crossing to the left border of the road [20], called TLC_1. Drivers' response was measured with the steering amplitude δ_2 and the steering duration τ_2. The situation at t_2 was characterized by the lateral position, called LP_2.

One-way ANOVAs were performed, with group as independent variable, and δ_2 and τ_2 as dependent variables. Linear regressions were also performed for each group, to explain δ_2 and τ_2 by TLC_1, and LP_2 by δ_2 and τ_2.

During phase 3, the situation at t_2 was characterized by the lateral position, called LP_2, and drivers' response with the time to stabilization, called *TTS* (with the criterion previously described). Thus, *TTS* corresponds to the duration of phase 3.

A one-way ANOVA was performed, with group as independent variable, and *TTS* as dependent variable. Linear regressions were also performed for each group, to explain *TTS* by LP_2.

4. Results

4.1. Groups homogeneity

There were no significant difference of age ($F(2,24) = 0.13$; $p = 0.88$) nor gender ($\chi^2(2) = 0.07$; $p = 0.96$) between groups.

4.2. Normal driving

Figure 5 shows the mean values of LILP. On the straight line, there was no significant effect of group on LILP during the familiarization drive ($F(2,24) = 0.62$; $p = 0.54$). Paired t-tests showed no difference in LILP between the familiarization drive and the test drive for Control group ($t(8) = 1.97$; $p = 0.08$), LDW group ($t(8) = 1.69$; $p = 0.13$), nor LKA group ($t(8) = 1.41$; $p = 0.20$).

On the curve, results showed no significant effect of the group on the LILP for the familiarization drive ($F(2,24) = 0.06$; $p = 0.94$). Paired t-tests showed no difference in LILP between the familiarization drive and the test drive for Control group ($t(8) = 0.61$; $p = 0.56$), but a significant difference for LDW group ($t(8) = 3.40$; $p < 0.01$) and LKA group ($t(8) = 4.48$; $p < 0.01$).

Figure 6 shows the mean values of left-LILP and right-LILP. Paired t-tests on left-LILP and right-LILP showed a significant difference between the familiarization drive and the test drive, only for left-LILP and LKA group. Table 1 summarizes these results.

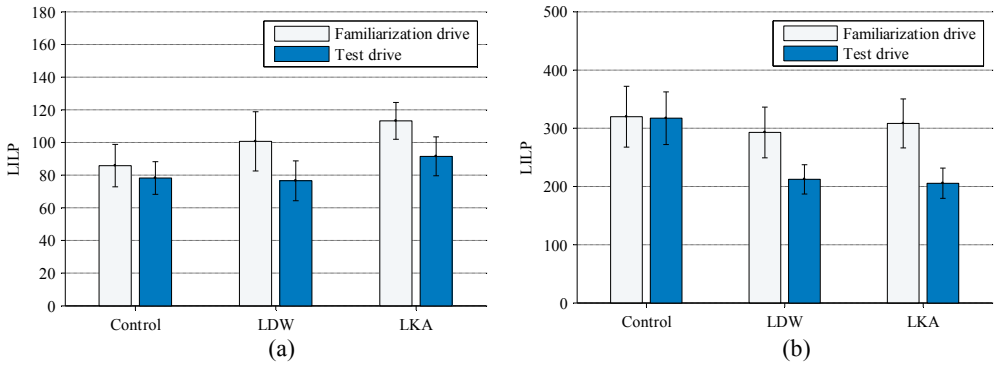


Fig. 5 – Mean values of LILP or all groups: (a) on the straight line, (b) on the curve. Error bars represent standard errors

Tab. 1 - Results of paired t-tests on left-LILP and right-LILP

Group	Left-LILP	Right-LILP
Control	$t(8) = 0.34$; $p = 0.74$	$t(8) = 0.41$; $p = 0.69$
LDW	$t(8) = 2.03$; $p = 0.08$	$t(8) = 2.01$; $p = 0.08$
LKA	$t(8) = 2.69$; $p = 0.03$	$t(8) = 1.90$; $p = 0.09$

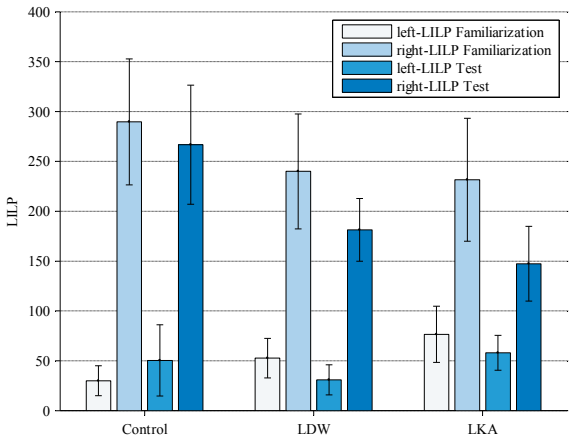


Fig. 6 - Mean values of left-LILP and right-LILP for all groups. Error bars represent standard errors

4.3. Emergency situation

All subjects from all groups succeeded in avoiding the truck. Only one subject from LKA group lost the control of the vehicle after overtaking the truck, and left the road. At t_1, the peak value of the first steering correction was 4.93° to the left on average (SD = 14.84), and was not significantly different from 0° (t(26) = 1.73; p = 0.1). Subjects also started to countersteer significantly before the time of their maximal lateral deviation (t(26) = 28.92; p = 0.00), 1.65 seconds sooner on average (SD = 0.3). θ_0 was 8.23° on average (SD = 1.28).

During phase 1, there was no significant effect of group, neither on δ_1 (F(2,24) = 0.2; p = 0.82), nor on τ_1 (F(2,24) = 0.95; p = 0.4).

Table 2 summarizes the regression results on δ_1, which show a significant correlation between θ_0 and δ_1 for LDW and LKA groups, and a significant correlation between δ_1 and θ_1 for Control and LDW groups.

We can see from the sign of β coefficients in Table 2 that for LDW and LKA groups, the more on the left the obstacle at t_0, the bigger the steering amplitude. Similarly, for Control and LDW groups, the bigger the steering amplitude, the more on the right the obstacle at t_1.

Table 3 summarizes the regression results on τ_1, which show a significant correlation between θ_0 and τ_1 for Control group.

Tab. 2 - Relations between the situation and steering amplitude during phase 1

	Regression of δ_1 on θ_0			Regression of $\theta_1$on δ_1		
Group	β	p	Adjusted R²	β	p	Adjusted R²
Control	-0.425	0.254	0.064	0.737	0.024	0.477
LDW	-0.790	0.011	0.571	0.743	0.022	0.488
LKA	-0.865	0.003	0.713	-0.501	0.169	0.144

Tab. 3 - Relations between the situation and steering duration during phase 1

	Regression of τ_1 on θ_0			Regression of $\theta_1$on τ_1		
Group	β	p	Adjusted R²	β	p	Adjusted R²
Control	0.719	0.029	0.449	-0.368	0.330	0.012
LDW	-0.187	0.63	~ 0	0.163	0.674	~ 0
LKA	0.292	0.446	~ 0	0.186	0.631	~ 0

Tab. 4 - Relations between the situation and steering amplitude during phase 2

	Regression of δ_2 on TLC_1			Regression of LP_2 on δ_2		
Group	β	p	Adjusted R²	β	p	Adjusted R²
Control	-0.477	0.195	0.117	-0.628	0.070	0.307
LDW	-0.847	0.004	0.677	0.504	0.166	0.148
LKA	-0.563	0.115	0.212	-0.102	0.794	~ 0

Tab. 5 - Relations between the situation and steering duration during phase 2

	Regression of τ_2 on TLC_1			Regression of LP_2 on τ_2		
Group	β	p	Adjusted R²	β	p	Adjusted R²
Control	0.814	0.008	0.614	0.117	0.764	~ 0
LDW	0.854	0.003	0.69	-0.660	0.053	0.355
LKA	0.76	0.018	0.517	-0.099	0.800	~ 0

Tab. 6 - Relations between the lateral position and the time to stabilization during phase 3

	Regression of *TTS* on LP_2		
Group	β	p	Adjusted R²
Control	-0.504	0.167	0.147
LDW	0.214	0.580	~ 0
LKA	0.253	0.511	~ 0

For phase 2, there was no significant effect of group, neither on δ_2 ($F(2,24) = 0.58$; $p = 0.57$), nor on τ_2 ($F(2,24) = 1.25$; $p = 0.30$).

Table 4 summarizes the regression results on δ_2, which show a significant correlation between TLC_1 and δ_2 for LDW group.

Table 5 summarizes the regression results on τ_2, which show a significant correlation between TLC_1 and τ_2 for all groups.

For phase 3, there was no significant effect of group on *TTS* ($F(2,24) = 1.77$; $p = 0.19$). Table 6 summarizes the regression results.

5. Discussion

5.1. Normal driving

Results showed that the LILP in the curve significantly decreased during the test drive for subjects with LDW and LKA. These systems thus made subjects drive closer to the lane center.

A further analysis aimed at understanding more precisely how drivers modified their trajectory in the curve, and whether LCAS affected left or right departures (the curve was oriented to the right). The results showed, for LDW group, that neither left-LILP nor right-LILP, taken individually, shows a significant decrease during the test drive. For LKA group, the decrease in LILP during the test drive resides mostly in left departures (left-LILP shows a significant decrease but right-LILP doesn't). The LKA thus prevented subjects from departing towards the outside of the curve. These results confirm the interest of the emergency situation studied in this paper. Indeed, neither LDW nor LKA showed a clear effect on reducing right departures. Therefore, these systems were no help in avoiding an obstacle on the right after a curve oriented to the right. However, these results also suggest that the effects of LCAS in this emergency situation would be different after a curve oriented to the left, as LKA subjects would initially be in a better position to avoid the obstacle.

5.2. Emergency situation

Globally, subjects easily managed to avoid the truck. They performed a relatively small steering correction, and countersteered quickly. Indeed, the road curvature allowed them to quickly deviate from their trajectory. Unlike overtaking maneuvers, there was no stabilization on the left lane [22], probably because of the larger speed difference between the vehicles.

Given the results for phase 1, it appears that the reaction of subjects from LDW and LKA groups is mostly determined by the obstacle angle at the beginning of the phase, whereas the reaction of subjects from Control and LDW groups is rather determined by the obstacle angle at the end of the phase, after the steering correction. Therefore, it appears that automation induced more reaction and less anticipation for this phase.

Here, the amplitude of obstacle angle values was pretty limited but, in light of these results, it is likely that more extreme values would lead to a bigger steering amplitude, especially for subjects using LKA.

This could cause difficulties to recover the control of the vehicle afterwards. In this experiment, one subject from LKA group lost the control of the vehicle. Although it is not significant, we believe that a more critical situation, with a smaller obstacle angle (by placing the truck more on the left, or increasing the road curvature at the emergency location) could emphasize this effect.

On the contrary, the influence of LCAS during phases 2 and 3 appears to be limited. The observed differences mostly manifested themselves during phase 1. Therefore, these findings suggest that LCAS would mostly influence open-loop control, because of previous training with the systems.

6. Conclusion

In this study, we carried out an experiment on a fixed-base driving simulator, on drivers' reaction in an obstacle avoidance maneuver, when driving with LCAS. The results confirmed the efficiency of LCAS in improving lane keeping in curves, but showed that assisted and non-assisted drivers equally succeeded in avoiding the obstacle.

However, a further examination of the avoidance maneuver gave promising results, suggesting an effect of LCAS in the first phase of the maneuver, which involves mainly open-loop control [18]. Indeed, during that phase, subjects driving with LCAS adopted a reaction determined by the level of emergency of the initial situation.

On the other hand, subjects using no LCAS, or a LCAS with a lower level of automation, adopted a reaction which determined the safety outcome of the final situation. These results suggest a potential safety impact of LCAS with a high level of automation. Indeed, we believe that a more critical emergency situation could result in a reaction too strong from drivers using such systems, causing difficulties to keep the control of the vehicle.

Our findings also tend to show that the influence of LCAS in the emergency situation is more probably a change in drivers' behavior due to previous training with LCAS, than a disturbance due to LCAS triggering during the avoidance maneuver.

Future research will focus on creating new emergency scenarios, in order to emphasize the observed trends.

It could include more critical situations, and using a moving-base driving simulator, as its importance for steering behavior has been demonstrated [23]. Such scenarios could be useful in the future, to study drivers' reaction in the early stages of ADAS design.

References

1. L. Evans. *Traffic Safety*. Science Serving Society. 2004.
2. T. B. Sheridan, W. L. Verplanck. *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*. MIT Man-Machine Systems Laboratory. Cambridge, MA. 1978.
3. M. R. Endsley, D. B. Kaber. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42 (3), 462-192. 1999.
4. R. Parasuraman, T. B. Sheridan, C. D. Wickens. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 30 (3), 286-297. 2000.
5. J.-M. Hoc, M. S. Young, J.-M. Blosseville. Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10 (2), 135-160. 2009.
6. D. B. Kaber, M. R. Endsley. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5 (2), 113-153. 2004.
7. R. Parasuraman, V. Riley. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39 (2), 230-253. 1997.
8. F. Saad. Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work*, 8 (3), 175-181. 2006.
9. A. Ben-Yaacov, M. Maltz, D. Shinar. Effects of an in-vehicle collision avoidance warning system on short- and long-term driving performance. *Human Factors*, 44 (2), 335-342. 2002.
10. J. M. Sullivan, O. Tsimhoni, S. Bogard. Warning reliability and driver performance in naturalistic driving. *Human Factors*, 50 (5), 845-852. 2008.
11. R. Deborne, A. Barthou, D. Toffin, G. Reymond, A. Kemeny. Simulation study of driver stress and performance to an unexpected event. *Proceedings of Driving Simulation Conference*, 111-120. 2008.
12. A. Koustanaï, V. Cavallo, P. Delhomme, A. Mas. Familiarization with critical situations when using a forward collision warning: effects on driver-system interactions. *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 37-47. 2010.
13. L. Nilsson. Safety effects of adaptive cruise controls in critical traffic situations. *Proceedings of the second World Congress on Intelligent Transport Systems*. 1995.
14. J.-M. Hoc, F. Mars, I. Milleville-Pennel, E. Jolly, M. Netto, J.-M. Blosseville. Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: delegation and mutual control. *Le Travail Humain*, 2, 153-182. 2006.
15. J. Navarro, F. Mars, J.-F. Forzy, M. El-Jaafari, J.-M. Hoc. Objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems applied to lateral control assistance. *Acc. An. & Prev.*,42(3), 904-912.2010.
16. S. Mattes, A. Hallén. Surrogate distraction measurement techniques: the lane change test. *Driver distraction: Theory, Effects and Mitigation*, 107-122. CRC Press. 2009.
17. T. Petzoldt, N. Bär, C. Ihle, J. F. Krems. Learning effects in the lane change task (LCT)—Evidence from two experimental studies. *Trans. Res. Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14 (1), 1-12. 2011.
18. J. A. Michon. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do□? *Human behavior and traffic safety*, 485-520. New York: Plenum Press. 1985.
19. D. T. McRuer, R. W. Allen, D. H. Weir, R. H. Klein. New results in driver steering control models. *Human Factors*, 19 (4), 381-397. 1977.
20. W. Van Winsum, D. De Waard, K. A. Brookhuis. Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2 (3), 139-149. 1999.
21. B. R. Fajen, W. H. Warren. Behavioral dynamics of steering, obstable avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29 (2), 343-362. 2003.
22. K. Younsi, J. Floris, B. Rajaonah, P. Simon, P. Loslever, J.-C. Popieul. Study of driver's behavior during overtaking situations. *International Conference on Road Safety and Simulation*. 2009.
23. A. Kemeny, F. Panerai. Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (1), 31-37. 2003.

UTILISATION DES SIMULATEURS DE CONDUITE POUR L'EVALUATION DES SYSTEMES D'AIDE A LA CONDUITE EN SITUATION D'URGENCE

RESUME : L'introduction de systèmes d'aide à la conduite dans les voitures a de nombreuses conséquences, notamment sur le comportement des conducteurs et leur interaction avec le véhicule. Le gain de sécurité recherché lors de l'introduction de systèmes d'aide peut s'en trouver menacé. Pour évaluer la sécurité réelle en résultant, les simulateurs de conduite présentent une alternative sûre et peu coûteuse. Ce travail doctoral s'appuie sur des études expérimentales menées sur des simulateurs de conduite avec différents systèmes d'aide. Une première partie expérimentale porte sur l'assistance au contrôle longitudinal : la familiarisation des conducteurs avec un Forward Collision Warning lors de situations critiques a été étudiée. Une deuxième partie expérimentale porte sur l'assistance au contrôle latéral : le comportement des conducteurs avec un Lane Departure Warning et un Lane Keeping Assistant a été étudié, notamment lors d'une situation d'évitement d'obstacle d'urgence. Cette partie expérimentale a été réalisée sur un simulateur statique et sur un simulateur dynamique. Les résultats obtenus sur les deux simulateurs ont alors été mis en perspective, afin de discuter de l'intérêt de la restitution de mouvements pour l'étude du comportement des conducteurs en présence de systèmes d'aide à la conduite.

Mots clés : simulation de conduite, systèmes d'aide à la conduite, situations d'urgence, sécurité routière.

USE OF DRIVING SIMULATORS FOR ADVANCED DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS EVALUATION IN EMERGENCY SITUATIONS

ABSTRACT : Introducing advanced driver assistance systems in cars has numerous consequences, particularly on drivers' behavior and their interaction with the vehicle. The expected safety benefits of assistance systems can thus be jeopardized. In order to assess the actual safety benefits, driving simulators offer a safe and cheap alternative. This doctoral work relies on experiments carried out on driving simulators with different assistance systems. A first experimental part focuses on longitudinal control assistance: we studied drivers' familiarization with a Forward Collision Warning system in critical situations. A second experimental part focuses on lateral control assistance: we studied drivers' behavior with a Lane Departure Warning system and a Lane Keeping Assistant system, especially in an obstacle avoidance emergency situation. This experiment was replicated on a fixed-base simulator and a moving-base simulator. Results obtained on both simulators were compared, in order to discuss the relevance of motion feedback for studying drivers' behavior with advanced driver assistance systems.

Keywords : driving simulation, advanced driver assistance systems, emergency situations, driving safety.



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY