



HAL
open science

Systèmes d'alerte anti-collision : état de l'art et impact du niveau de fiabilité et du moment de déclenchement

Alexandra Fort, Mercedes Bueno, Christophe Jallais

► To cite this version:

Alexandra Fort, Mercedes Bueno, Christophe Jallais. Systèmes d'alerte anti-collision : état de l'art et impact du niveau de fiabilité et du moment de déclenchement. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2014, 62 p. hal-01686511

HAL Id: hal-01686511

<https://hal.science/hal-01686511>

Submitted on 17 Jan 2018

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

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

IFSTTAR - TS2 - LESCOT
Cité des Mobilités
25 avenue François Mitterrand
69675 BRON Cedex

Juin 2014

Responsable des travaux :

Alexandra FORT
alexandra.fort@ifsttar.fr
04 72 14 25 80



Systemes d'alerte anti-collision : état de l'art et impact du niveau de fiabilité et du moment de déclenchement



UNIVERSITÉ
LUMIÈRE
LYON 2
UNIVERSITÉ DE LYON

Auteurs : Alexandra Fort, Mercedes Bueno et Christophe Jallais

IFSTTAR-TS2-LESCOT

N° de contrat FSR : 2012/MP/05
Date de notification du contrat : 26/10/12
Durée du contrat : 24 mois
Nom du responsable FSR : Marie Antoinette Dekkers

Confidentialité : non

Résumé

Les données de la littérature montrent que les collisions par l'arrière représentent environ 30% de la totalité des accidents. Afin de diminuer l'impact de ces accidents, des assistances à la conduite de types alerte ont vu le jour. Si ces assistances sont conçues pour avoir un impact bénéfique sur la sécurité en réorientant l'attention des conducteurs sur les éléments importants de la route, des efforts de recherche pour mieux cerner l'ensemble des effets positifs et potentiellement délétères de ces systèmes sont encore nécessaires.

Il est notamment connu que ces systèmes pour des raisons techniques, ne sont pas parfaitement fiables. De plus les concepteurs doivent prendre des décisions portant sur la sensibilité des systèmes, sur le type d'erreurs favorisées (fausses alertes et non détections) et sur le moment de déclenchement de l'alerte. Ces caractéristiques sont déterminantes pour la confiance que les usagers vont porter aux systèmes, leur acceptabilité, et leur efficacité.

Si ces questions ont d'ores et déjà été examinées dans diverses études, l'usage de différents types d'alerte (sonore, visuelle, tactile), de différents niveaux de fiabilité et de types d'erreurs engendrées (fausse alerte et/ou non détection), de diverses tâches distractives (visuelle, auditive, motrice ...), ou de divers scénarios de conduite, rend difficile la compréhension de ces mécanismes. Par ailleurs, l'adaptation comportementale à ces systèmes en fonction de ces caractéristiques, ainsi que l'impact sur le stress ressenti des usagers, n'ont à notre connaissance pas été investigués.

Ce livrable vise tout d'abord à présenter un état de l'art sur les systèmes d'alerte anti-collision ainsi que les travaux portant sur l'efficacité et l'acceptabilité d'une alerte sonore avertissant d'un risque de collision réalisés au cours du projet ACT, financé par la Fondation Sécurité Routière.

Mots-clés : alerte anti-collision, simulateur, distraction, stress, fiabilité, acceptabilité, efficacité.

Table des matières

CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART	4
1. Contexte.....	4
2. Les systèmes d'alerte anti-collision : Rôle et principes	5
a. Les collisions par l'arrière	5
b. Principes.....	6
c. Fonctionnement du système anti-collision : Algorithmes	7
d. Systèmes actuellement sur le marché	8
3. Efficacité des systèmes d'alerte anti-collision	9
a. Bénéfices du système.....	9
Bénéfices estimés par modélisation	9
Bénéfices estimés à partir des études sur simulateur de conduite.....	10
Bénéfices estimés à partir des études sur route	10
Bénéfices estimés à partir des données des compagnies d'assurance	11
b. Fiabilité et acceptabilité.....	12
3. Systèmes d'alerte et distraction des usagers.....	15
4. Confort/Inconfort, stress et confiance dans le système d'alerte anti-collision.....	18
5. Adaptation.....	19
CHAPITRE 2 - APPORT DU PROJET ACT	24
1. Objectifs	24
2. Approche expérimentale.....	24
a. Simulateur de conduite	24
b. Données recueillies	25
Données subjectives	26
Paramètres physiologiques	26
Paramètre comportementaux	26
c. Tâche principale sur simulateur de conduite	27
e. Tâche secondaire	27
3. Expérience 1	28
a. Objectifs et protocole	28
b. Résultats.....	29
Effets généraux	29
Introduction du système (S1 vs S2).....	31
Efficacité des systèmes lorsque les participants sont distraits (S2 vs S3 et S1 vs S3) ...	31
Système inactif et effet de transfert (S4 vs S5 et S1 vs S5).....	33

Données physiologiques	35
Jugement d'utilité et de satisfaction	36
Résultats obtenus pour le stress ressenti	37
c. Conclusion préliminaire.....	38
Introduction du système (S2).....	38
Effet de la distraction (S3)	39
Mise à l'arrêt du système (S5)	40
4. Expérience 2	41
a. Objectifs et protocole	41
b. Résultats principaux	42
Effets généraux	42
Introduction du système (S1 vs S2).....	43
Efficacité des systèmes lorsque les participants sont distraits (S2 vs S3 et S1 vs S3)...	44
Système inactif et effet de transfert (S4 vs S5 et S1 vs S5).....	46
Données physiologiques	47
Jugement d'utilité et de satisfaction	48
Résultats obtenus pour le stress ressenti	48
c. Conclusion préliminaire.....	49
Introduction du système (S2).....	49
Impact de la tâche distractive (S3)	50
Mise à l'arrêt du système (S5).....	51
5. Conclusions.....	51
6. BIBLIOGRAPHIE.....	56

CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART

1. Contexte

Depuis le début des années 2000, le nombre de victimes d'accidents de la route en Europe a considérablement diminué avec des baisses atteignant quasiment 50% (European Commission, 2013). Toutefois, malgré ces chiffres encourageants, les accidents de la circulation restent l'un des principaux facteurs de mortalité. En 2008, ils constituaient la première cause de décès chez les jeunes âgés de 5 à 29 ans en Europe (World Health Organization, 2011).

Il est établi que les causes de ces accidents sont en général multifactorielles et que le facteur humain dans son interaction avec le véhicule et l'environnement joue un rôle prépondérant dans grands nombres de ces accidents. En effet, la conduite est une activité complexe nécessitant sans cesse des ajustements et réajustements et reposant sur les capacités sensori-motrices, perceptives mais aussi attentionnelles du conducteur.

Dans ce contexte, et en vue d'atteindre l'objectif fixé par la Commission Européenne de réduire de moitié le nombre de victimes d'accidents de la route en 2020, de nouvelles mesures ont été proposées pour essayer d'améliorer l'éducation et la formation des utilisateurs, renforcer l'application des règles de sécurité routière, améliorer les infrastructures ainsi que les services d'urgence et la protection des utilisateurs plus vulnérables (European Commission, 2010; World Health Organization, 2004). Des progrès en matière de sécurité routière sont également espérés par le développement de véhicules « intelligents » et plus sûrs (European Commission, 2010; World Health Organization, 2004). Les systèmes de transport intelligent (ITS pour les sigles en anglais Intelligent Transport Systems) sont conçus avec l'objectif d'améliorer la sécurité, l'efficacité, la mobilité et la productivité dans le domaine du transport (Bayly et al., 2007). Parmi ces systèmes, nous retrouvons notamment les systèmes d'alerte qui permettent d'attirer l'attention des conducteurs vers les éléments pertinents de la scène routière.

Les estimations fournies dans différents rapports concernant les assistances à la conduite montrent un bilan très positif en termes de sécurité routière en soulignant la réduction du nombre de victimes sur les routes (McKeever, 1998; OECD, 2003). Toutefois et bien que le but initial de ces systèmes soit l'amélioration de la sécurité, l'introduction de ces systèmes et l'interaction avec les conducteurs peuvent constituer une importante transformation des pratiques habituelles dans l'activité de conduite. Par conséquent, il nous semble important

que les recherches s'intéressent non seulement à l'impact positif mais aussi à l'impact potentiellement négatif de ces systèmes sur le comportement des conducteurs.

Dans ce rapport, nous nous focaliserons sur les systèmes d'alerte anti-collision en présentant tout d'abord leur rôle et leur principe de fonctionnement, puis les facteurs pouvant affecter leur efficacité et acceptabilité ainsi que les données actuelles concernant l'adaptation comportementale des usagers à ces systèmes.

2. Les systèmes d'alerte anti-collision : Rôle et principes

a. Les collisions par l'arrière

En France, selon l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (2012), les collisions par l'arrière et collisions en chaîne totalisaient respectivement 5,2% et 1,4% de la mortalité routière. Elles étaient également responsables de respectivement 12,1% et 4,1% des blessés.

Outre la mortalité et le nombre de blessés, ces accidents présentent un coût économique important pour la société et perturbent gravement la circulation.

Différents facteurs peuvent expliquer la survenue de ce type de collisions : des facteurs liés au véhicule, des facteurs environnementaux et/ou des facteurs humains. Toutefois, les problèmes techniques du véhicule, comme une faille des freins, expliqueraient seulement 10% de ces collisions (Knipling et al., 1993; Vogel & Bester, 2005). Les conditions environnementales dégradées ne représenteraient quant à elles que 11 à 15% des collisions par l'arrière en fonctions des différentes études (Dingus et al., 2006; Knipling, et al., 1993; Vogel & Bester, 2005). En effet, la plupart de ces collisions se produisent pendant la journée (entre 9h30 et 15h30), dans de bonnes conditions météorologiques, sur des lignes droites et lorsque la surface de la chaussée est sèche et avec des vitesses modérées généralement inférieures à 60 km/h. Dans ces conditions, c'est donc le facteur humain qui serait en cause. Ainsi les facteurs humains expliqueraient de 75% à 93% des cas selon les études (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993; Vogel & Bester, 2005).

Ceci peut en partie être expliqué par le non-respect de l'intervalle de sécurité entre véhicules. Celui-ci est fixé à 2 secondes par le code de la route français. Or, plus de 50% des automobilistes ne respecteraient pas cette règle. Ce non-respect serait en partie dû à la difficulté de se figurer à quoi correspond cet intervalle en pratique. Par ailleurs, l'inattention du conducteur a été identifiée comme étant un facteur contributif, impliqué dans environ deux tiers de ces accidents (Dingus et al., 2006; Knipling et al., 1993). L'inattention du conducteur peut avoir de nombreuses répercussions sur le comportement de conduite, et notamment sur le respect des distances de sécurité ou des limitations de vitesse.

De fait, les systèmes d'alerte anti-collision semblent une solution parfaitement adaptée pour prévenir ces accidents en avertissant le conducteur d'un danger potentiel.

b. Principes

Les systèmes de prévention ou d'évitement des collisions sont de plus en plus nombreux sur le marché. Ils apparaissent depuis peu en série et sur de petits modèles et non plus uniquement sur les véhicules haut de gamme. Les principes de fonctionnement de ces systèmes sont relativement proches. Qu'il s'agisse du Pre-Safe Brake de Mercedes, du Front Assist de Volkswagen, du CMBS de Honda, du City Safety & Collision Warning with Full Auto-Brake de Volvo ou bien encore de l'Active City Stop de Ford, leur fonctionnement est assez similaire.

Les systèmes d'alerte anti-collision par l'arrière ont pour fonction de détecter la présence d'objets sur la voie susceptibles de constituer un danger. Ils avertissent notamment le conducteur lorsque la distance avec le véhicule précédent est trop faible au regard de la vitesse des véhicules, autrement dit lorsque la distance inter-véhiculaire n'est pas sécuritaire et qu'une collision est possible si le conducteur n'agit pas. En cas de détection d'un tel évènement, le système émet une alerte pour prévenir le conducteur. Les systèmes anti-collisions sont constitués de capteurs et de caméras. Lorsqu'un risque de collision est détecté, une alerte auditive, visuelle et/ou haptique est présentée pour avertir le conducteur (e.g. Houser et al. 2005, Jamson et al. 2008). Ces systèmes peuvent également être couplés à des systèmes prenant momentanément le contrôle du véhicule pour initier un freinage (système d'évitement de collision). Ainsi, et en l'absence de réaction du conducteur suite à l'alerte, la voiture pourra freiner automatiquement afin d'éviter ou, dans certains cas, d'atténuer l'accident. Si, à un moment quelconque, le conducteur intervient en freinant

brusquement ou en braquant pour éviter l'accident, le système se désactive automatiquement. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés comme substitut au conducteur qui doit rester attentif à tout moment.

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

c. Fonctionnement du système anti-collision : Algorithmes

Le déclenchement du signal avertisseur est déterminé au moyen d'algorithmes qui calculent un seuil spécifique en fonction de différents paramètres. Bien qu'une grande variété d'algorithmes ait été conçue pour calculer le moment de déclenchement du signal (voir par exemple, McLaughlin et al., 2009; Seiler et al., 1998), la plupart d'entre eux sont basés soit sur une approche cinématique, soit sur une approche perceptuelle (Bella & Russo, 2011; Brown et al., 2001). L'approche cinématique détermine la distance minimale nécessaire pour arrêter le véhicule en toute sécurité. Pour cela, cet algorithme calcule certains paramètres spécifiques aux véhicules impliqués dans la possible collision, comme la vitesse, la position

et la décélération. De plus, il incorpore également une estimation de deux paramètres spécifiques au conducteur qui peuvent influencer considérablement sur l'efficacité du signal : le temps de réaction et la force de décélération (McLaughlin et al., 2009). L'approche perceptuelle est basée sur le temps avant que la collision se produise si la position et la vitesse actuelle des véhicules restent constantes. Actuellement, il n'y a pas de dominance claire d'un modèle sur l'autre, ni d'un algorithme sur un autre. Pratiquement chaque modèle de voiture a son propre algorithme ce qui se traduit par des temps d'alerte qui peuvent varier largement dans des conditions de trafic similaires. Ainsi, une étude réalisée sur piste avec trois modèles différents de véhicules équipés d'un FCWS a estimé le temps à la collision avec le véhicule précédent à partir du moment où le signal avertisseur est déclenché (Forkenbrock & O'Harra, 2009). Bien que les conditions de simulation aient rempli les mêmes critères pour les trois véhicules, les prédictions du temps à la collision ont montré des différences allant jusqu'à 800 ms entre un modèle et un autre.

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

d. Systèmes actuellement sur le marché

De nombreux systèmes anti-collision ont été conçus et introduits sur le marché (Forkenbrock & O'Harra, 2009; Grover et al., 2008; Schoitsch, 2008). En général, ils apparaissent intégrés à des systèmes de régulation de vitesse adaptatifs (systèmes qui maintiennent une vitesse et une distance de sécurité constante, Adaptive Cruise Control) car ils utilisent les informations fournies par les mêmes capteurs. La plupart des systèmes anti-collision intégrés dans les véhicules comportent le système d'alerte (FCWS) et le système d'évitement de collisions (FCAS). Dans la première phase, le système généralement active un signal auditif et visuel qui est suivi d'une phase de freinage autonome du véhicule, si le conducteur n'a pas réagi. Cette phase de freinage peut également être accompagnée de signaux auditifs, visuels voire tactiles (Campbell et al., 2007; Grover et al., 2008).

En règle générale, les capteurs des systèmes anti-collision couvrent une distance comprise entre 100 et 200 m de long et détectent des obstacles situés dans un angle d'environ 16° dans le plan horizontal et 4° approximativement dans le plan vertical. Le système est activé à partir d'une certaine vitesse (autour de 10 ou 15 km/h). Il peut détecter les véhicules

stationnaires apparaissant dans la même trajectoire que celle du véhicule équipé ainsi que les véhicules en mouvement. Des risques de non-détection sont annoncés pour de petits véhicules à deux roues. Le système peut ne pas fonctionner lorsque les capteurs sont totalement ou partiellement bloqués (par la neige, les salissures, etc.) ou lorsqu'un défaut est détecté. Dans ces cas, le système peut informer les conducteurs à travers des signaux visuels et éventuellement auditifs de cette interruption temporaire du système. De plus, le système peut ne pas être efficace dans certaines conditions, comme lorsque la distance inter-véhiculaire est trop petite, quand il y a des décélérations et accélérations brusques ou lors de changements soudains de trajectoire d'un véhicule. (European Commission, 2011; Grover et al., 2008; ISO 15623, 2002; SAE J2400, 2003).

3. Efficacité des systèmes d'alerte anti-collision

a. Bénéfices du système

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

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

Bénéfices estimés par modélisation

Ces techniques appliquent les différents algorithmes sur des données d'accidents de la vie réelle pour prédire le nombre d'accidents qui auraient pu être évités si le système avait été

disponible. En utilisant cette méthode, Georgi, et al. (2009) ont estimé que le FCWS pourrait éviter 38% des collisions et le FCAS 72%. De plus, lorsqu'un accident est inévitable, la vitesse moyenne de collision est réduite de 9% pour le FCWS et de 25% pour le FCAS. Cependant, en fonction de la base de données utilisée, le bénéfice des systèmes anti-collision peut varier considérablement. Ainsi, selon les données fournies par Zhu (2001) le pourcentage de réduction des collisions est plus élevé pour le système d'alerte (17%) que pour le système d'évitement (5%). Si le signal avertisseur est déclenché suffisamment à l'avance, le conducteur pourrait être capable d'éviter la collision par lui-même sans que le système d'évitement soit activé, ce qui pourrait expliquer ce résultat. Cependant, le bénéfice potentiel en termes de réduction de la mortalité reste plus élevé pour le système d'évitement que pour le système d'alerte (29% versus 24%, respectivement).

Bénéfices estimés à partir des études sur simulateur de conduite

Les simulateurs de conduite ont été l'un des outils les plus fréquemment utilisés dans l'évaluation de l'efficacité des FCWS. Les bénéfices dans ces études ont montrés, par exemple, une réduction du nombre de collisions (Lee et al., 2002), des temps de réaction au freinage plus rapides suite à la détection de situations critiques dans des conditions de visibilité normales (Abe & Richardson, 2006) ou réduites (Harder et al., 2003 ; Bueno et al. 2012, 2013, 2014) et l'adoption de distances de sécurité plus longues et plus sûres (Ben-Yaacov et al., 2002).

Toutefois, Muhrer et al. (2012) utilisant un système d'alerte couplé à un système d'évitement des collisions (signal auditif et visuel), n'ont pas observé de bénéfice avec le système que ce soit au niveau des temps de réaction, des distances inter-véhiculaires ou des taux de décélérations. Leurs résultats ont montré certains effets négatifs du système se traduisant par une légère augmentation de la vitesse et une augmentation de la fréquence des regards vers le tableau de bord. Cependant, s'agissant d'un système d'évitement des collisions, l'effet du système a été globalement positif car aucun accident n'a été signalé pour les participants disposant du système, contrairement à ceux conduisant sans système.

Bénéfices estimés à partir des études sur route

L'efficacité de ces systèmes a aussi été analysée par des études réalisées en conditions plus écologiques. Par exemple, Najm et al. (2006) ont évalué l'impact d'un système anti-collision et d'un système de régulation de la vitesse adaptatif (Adaptive Cruise Control) pendant quatre semaines lors d'une étude réalisée dans des conditions réelles de conduite (Field Operational Test). Les résultats ont indiqué que le taux des évènements critiques, tels

que l'exposition à des conflits et quasi-accidents, a été réduit d'environ 20% dans la dernière période par rapport à la première période d'utilisation du système. Avec les données de cette étude, les auteurs ont estimé en se basant sur différentes bases de données, que le système pourrait prévenir environ 10% des collisions par l'arrière.

Bénéfices estimés à partir des données des compagnies d'assurance

Finalement, une autre façon d'estimer l'impact des systèmes anti-collisions dans le monde réel peut se faire à travers l'analyse des déclarations faites aux compagnies d'assurance. Ainsi, une étude a analysé l'impact de plusieurs systèmes d'aide à la conduite sur le marché, en comparant le nombre de déclarations provenant d'utilisateurs ayant un véhicule équipé de systèmes d'assistance à celles provenant d'utilisateurs ayant un véhicule non équipé. Le système d'évitement de collisions s'est imposé comme l'un des systèmes présentant le plus de bénéfices, particulièrement, en termes de réduction des demandes d'indemnisation de dommages des véhicules. Le système d'alerte anti-collision semble également réduire le taux d'accidents mais à une moindre échelle. Une des explications possibles à ce dernier résultat serait donnée par les différences entre les caractéristiques des deux systèmes. Par exemple, le système d'alerte anti-collision commence à fonctionner à partir de 32 km/h alors que le système d'évitement commence à partir de 5 km/h. En général, bien que ces résultats soient positifs au sujet de l'utilisation de ces systèmes, ces données doivent être interprétées avec prudence en raison de certaines limitations. Notamment, l'état du système (actif ou inactif) au moment des accidents n'était pas connu. De plus, les données ne rapportaient pas d'information détaillée concernant les conditions de la collision. Or, il est important de connaître certaines informations comme le point de collision afin d'estimer l'implication de chaque véhicule dans chaque type de collision (Highway Loss Data Institute, 2012a, 2012b, 2012c).

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

b. Fiabilité et acceptabilité

Comme présentés précédemment, les effets positifs des systèmes anti-collision ont été signalés dans de nombreux travaux. Des enquêtes auprès des usagers ont montré l'intérêt qu'ils portent au système. Ainsi Braitman et al. (2010) ont observé que la grande majorité des propriétaires de véhicules équipés d'un système d'alerte couplé à un système de freinage autonome conduisaient toujours avec les systèmes actifs. Il est intéressant de noter que 46% de ces conducteurs ont constaté conduire avec des marges de sécurité plus grandes. Ces résultats ont ensuite été reproduits dans une autre enquête avec plus de 300 utilisateurs (Eichelberger & McCartt, 2012). Toutefois, dans ce cas, seul 12% des conducteurs ont rapporté avoir le sentiment de conduire de façon plus sûre en respectant de plus grandes distances de sécurité.

Cependant, ces bénéfices peuvent être modulés par certains facteurs. La fiabilité du système est probablement l'un des aspects propres au système qui se répercute le plus sur son efficacité, son acceptabilité par les usagers et son bon usage.

Il est préconisé que l'information fournie aux conducteurs soit opportune et précise (European Commission, 1998). Or, les systèmes d'avertissement ne sont généralement pas fiables à 100%. En effet, selon le type d'algorithme et de capteur utilisé, le système peut mal fonctionner, produisant des fausses alarmes et / ou des absences de détection des événements critiques. Les fausses alarmes se réfèrent à des situations dans lesquelles un signal avertisseur est déclenché en l'absence de risque de collision. Les absences de détection se produisent lorsqu'un signal avertisseur n'est pas déclenché bien que la situation l'exigerait.

Les données chiffrées sur le taux réel de fausses alarmes et d'absences de détection de collisions ne sont pas fréquentes dans la littérature or, les données existantes montrent que ce taux était loin d'être acceptable il y a encore quelques années. Les résultats obtenus soit par des études réalisées sur route réelle (Najm et al., 2006), soit par de la modélisation à partir de données de l'accidentologie (McLaughlin et al., 2009) ont montré une faible précision du système (entre 32 et 56%) et un pourcentage très élevé de fausses alarmes (environ 60%). Sachant qu'il est recommandé que le taux de signaux avertisseurs considérés comme une nuisance ne dépasse pas un signal pour 322 km parcourus (Kiefer et al., 1999) ou un signal par semaine (Campbell et al., 2007), les données présentées ci-dessus ne paraissent pas très encourageantes.

En effet, un système trop sensible, se déclenchant de façon non appropriée (fausses alertes) pourrait être mal apprécié des usagers et irriter le conducteur. Si l'information fournie est trop souvent non pertinente, elle pourrait être négligée même lorsque elle est pertinente (Lerner et al., 1996) ou même pousser l'utilisateur à désactiver le système.

En plus des conséquences sur l'acceptabilité du système, un nombre trop élevé de fausses alarmes peut générer des changements sur le comportement des conducteurs. Ainsi, les fausses alertes récurrentes semblent allonger le temps de réaction au freinage (Abe et al., 2002) et induire des réponses de décélération non nécessaires (Maltz & Shinar, 2004). La réponse systématique aux fausses alertes peut ne pas avoir de graves conséquences si le trafic est faible, en revanche, elle pourrait générer des réactions de freinage en chaîne dans des conditions de circulation dense (Cummings et al., 2007). Un taux de fausses alertes élevé pourrait également être associé à une augmentation de la vitesse car les conducteurs auraient tendance à ignorer ces signaux avertisseurs (Cotté et al. 2001).

Les absences de détections de possibles collisions peuvent également affecter l'acceptation du système et la performance des conducteurs. En effet, un système trop sélectif pouvant manquer des événements critiques pourrait être perçu comme inutile et être rejeté par le conducteur (Bliss & Acton, 2003; Lees & Lee, 2007). De plus, si le système ne fonctionne pas correctement, le temps de réaction nécessaire en situation de collision peut être allongé considérablement, et pourrait même être plus long que lorsque le véhicule ne dispose pas du système (Abe et al., 2002).

Il est important de noter que la perception de la fiabilité d'un système peut être négativement impactée par un moment de déclenchement de l'alerte non approprié. En effet, un système parfaitement fiable peut être perçu par les conducteurs comme inefficace en raison du moment de déclenchement du signal avertisseur. En général, les signaux avertisseurs précoces sont plus efficaces et ont un niveau d'acceptation plus élevé par les conducteurs que ceux qui sont plus tardifs (Lee et al., 2002). Cependant, un système dont le signal avertisseur se déclencherait très précocement pourrait être perçu comme une nuisance, voire comme une fausse alerte. A l'inverse, un système se déclenchant de façon trop tardive pourrait là encore être perçu comme inutile par le conducteur et ainsi diminuer la confiance que l'utilisateur éprouve pour le dispositif. Si le conducteur réagit avant que l'alerte est été donnée, il peut considérer la situation comme une non-détection du système.

Toutefois, les fausses alarmes et les absences de détections n'ont pas toujours que des effets négatifs. L'émission de fausses alarmes pourraient permettre aux usagers de s'habituer aux alertes et de ne pas être surpris par elles au moment d'un risque réel de collision. Ainsi ils pourraient réagir à l'alerte de façon plus appropriée (Parasuraman et al.,

1997). Toutefois, dans une tâche de conduite sur simulateur avec un système d'alerte anti-collision (sans freinage autonome), Bliss et Acton (2003) ont observé que les participants répondaient de façon moins fréquente aux alertes et de façon moins appropriée lorsque la fiabilité du système était de 50%. Mais, de façon surprenante, ils ont également observé que les participants avaient moins de collisions avec ce système qu'avec un système parfaitement fiable. D'autre part, si un système détecte l'ensemble des risques possibles de collision, les conducteurs pourraient accorder trop de confiance au système et devenir ainsi plus vulnérables (Parasuraman et al., 1997), notamment, en cas de conduite d'un véhicule non équipé ou si le système d'alerte tombe en panne. En effet, il a été montré que les absences de détections ont été associées à une réduction de la vitesse de la part des conducteurs qui accorderaient plus de confiance à eux-mêmes et moins au système (Yamada & Kuchar, 2006). De même, Maltz et Shinar (2007) ont aussi trouvé des comportements plus sécuritaires lorsque le système était moins fiable chez des conducteurs distraits. Selon l'interprétation des auteurs, les conducteurs se reposeraient plus sur leurs propres habilités que sur le système en montrant ainsi de meilleures performances en cas d'une erreur du système.

Il est donc nécessaire de trouver un seuil approprié entre le taux de fausses alarmes et d'absences de détections. Toutefois, selon différentes recherches, le point où le système cesse d'avoir des bénéfices et devient inefficace reste incertain.

Ainsi, il a été montré que des systèmes d'alerte imparfaits peuvent être efficaces. Wickens et Dixon (2007) ont effectué une méta-analyse portant sur 22 études examinant des systèmes d'automatisation imparfaits. Ils ont conclu qu'un niveau de fiabilité de 70% pourrait être le critère en dessous duquel un système ne serait pas plus efficace que pas de système du tout. Plus précisément dans le domaine des systèmes d'alerte anti-collision, les résultats des différentes recherches semblent aller dans cette direction. Par exemple, dans une étude réalisée sur simulateur de conduite, Maltz et Shinar (2004) n'ont pas trouvé de différences entre des systèmes fiables à 60, 80 et 95%. Des résultats similaires ont été observés dans une étude sur piste (Ben-Yaacov et al., 2002). Bueno et collaborateurs (2012, 2013), ont examiné en conduite simulée, l'impact d'une alerte indiquant un risque de collision en fonction de la fiabilité du système. Pour cela ils ont utilisé une approche électrophysiologique permettant l'enregistrement de l'activité électrique cérébrale (électroencéphalographie, EEG) et l'analyse des potentiels évoqués (PE) par un événement pertinent pour la conduite (allumage feux stop de la voiture précédente). Cette technique est un outil efficace pour dissocier les stades sensoriel et cognitif du traitement de l'information, représentant ainsi une nouvelle approche dans l'étude de l'impact des signaux avertisseurs des systèmes anti-collision. Ainsi, ces auteurs ont montré que les conducteurs réagissent plus rapidement aux

décélérations d'une voiture précédente lorsqu'ils étaient avertis par un système que ceux qui n'étaient pas avertis (Bueno et al., 2012 ; Bueno et al., 2013). Ce résultat reste vrai pour les systèmes signalant 70 ou 75% des obstacles. Par ailleurs, ils ont observé que pour les événements correctement détectés, un système signalant 70% des risques de collision était aussi efficace qu'un système signalant tous les risques de collision mais ceci uniquement lorsque les conducteurs n'étaient pas distraits (Bueno et al., 2012). Au niveau électrophysiologique, les résultats de Bueno et al. (2013) ont également permis de constater que même une alerte ne signalant pas tous les obstacles peut avoir une influence positive sur l'anticipation et la préparation à la réponse des conducteurs.

Enfin, il convient de noter que le seuil pour déterminer si un système est efficace ou non, ne dépend pas seulement des caractéristiques du système (i.e. pourcentage de fiabilité, type d'erreurs) mais aussi des caractéristiques propre au conducteur tels que l'âge, l'expérience de conduite (Lees, 2010) ou de l'état attentionnel. Par exemple, comme il a été signalé plus haut, une alerte déclenchée trop tôt pourrait être considérée comme une nuisance, cependant elle pourrait être efficace si le conducteur est distrait. Abe et al. (2011) ont mené une étude sur simulateur de conduite où le véhicule précédent ralentissait fréquemment en raison d'un trafic intense. Ces alertes pourraient être perçues comme inutiles due à la haute fréquence d'émissions. Cependant, les auteurs ont observé que les conducteurs évaluaient les alertes de façon plus positive quand ils étaient distraits par une tâche visuelle secondaire que quand ils n'étaient pas distraits.

3. Systèmes d'alerte et distraction des usagers

Comme il a été évoqué précédemment, la principale cause des collisions par l'arrière est le défaut d'attention du conducteur. La multi-activité au volant (téléphoner, changer un CD, manger,...) est devenue chose courante et cela peut impliquer de détourner le regard de la route de façon fréquente. Notre attention peut être également attirée par une information saillante dans la scène routière que nous traiterons au détriment d'une autre information moins saillante mais essentielle pour la sécurité. En plus de ces cas, et d'autres comme les problèmes de vigilance et d'endormissement, les soucis de la vie quotidienne nous entraînent à penser à des choses, plutôt que de focaliser notre attention sur la route. Enfin,

toutes ces tâches compétitives, qu'elles soient de caractère cognitif, perceptif (i.e. visuel, auditif) ou moteur, peuvent impliquer une importante réduction des ressources attentionnelles allouées à la tâche de conduite.

Parmi les activités rentrant en compétition avec la tâche de conduite, se sont celles de type visuo-motrices (i.e. écrire un message de texto au téléphone) impliquant de détourner le regard de la route et de lever les mains du volant qui ont été le plus souvent étudiées. En général, ces tâches sont associées à une dégradation dans le contrôle de la trajectoire latérale de la voie (Drews et al., 2009), une augmentation du nombre de regards hors de la route (Kaber et al., 2012), une augmentation des temps de réaction au freinage du véhicule précédent (Drews et al., 2009) ainsi qu'une réduction de la distance inter-véhiculaire (Jamson & Merat, 2005). Si certains conducteurs peuvent adopter des stratégies de compensation en cas de distraction, comme une réduction de la vitesse (Engström et al., 2005), ces mesures ne sont pas toujours efficaces en cas d'urgence. C'est donc dans ces conditions, que les systèmes d'alerte anti-collision peuvent être particulièrement utiles aux conducteurs distraits.

Afin de déterminer si le bénéfice du système est plus, moins ou aussi important chez les conducteurs distraits que chez ceux qui ne sont pas distraits, certains auteurs ont comparé les effets du système avec et sans distraction. Plusieurs études menées sur simulateur ont montré un bénéfice similaire pour les conducteurs distraits et pour les conducteurs non distraits. Toutefois, nous noterons que dans ces études, les tâches distractives étaient principalement visuelles ou visuo-motrices.

Par exemple, Lee et collaborateurs (2002) ont observé un effet positif d'un système anti-collision combinant une alerte auditive et une alerte visuelle, pour les conducteurs non distraits ainsi que pour ceux distraits par une tâche visuelle. Plus précisément, leurs résultats ont montré des marges de sécurité plus larges, des temps de réaction plus rapides et des décélérations plus progressives lorsque le système était disponible. En outre, le système a également eu un impact en réduisant le nombre de collisions ainsi que la vitesse à l'impact, ce bénéfice étant plus important pour les conducteurs distraits que pour les non distraits. Ho et Spence (2009) ont également observé un effet positif du système (temps de réactions et de réponses correctes) en utilisant seulement une alerte auditive. Quant à Kramer et al. (2007), ils ont obtenu des résultats similaires en utilisant une tâche distractive visuo-motrice et un signal auditif et visuel. De plus, ils ont trouvé un bénéfice en termes de diminution des collisions.

En revanche, d'Abe et al. (2011) toujours sur simulateur ont montré des bénéfices d'un signal auditif uniquement chez les conducteurs distraits par une tâche nécessitant à la fois

des ressources visuo-motrices et cognitives (additionner 4 chiffres présentés sur un écran et entrer le résultat). Cependant, les auteurs ont suggéré que ce résultat pourrait être expliqué par des conditions de trafic intense où la haute fréquence de déclenchement du signal pourrait être perçue comme inutile. Les données subjectives ont confirmé cette idée, montrant que les conducteurs non distraits évaluaient les signaux avertisseurs plus négativement.

Ainsi les systèmes d'alertes semblent autant performants chez les sujets distraits que non distraits. Toutefois, contrairement à ces résultats, Bueno et al. (2012, 2013) ont observé un effet positif d'une alerte sonore signalant un risque de collision lorsque les conducteurs n'étaient pas distraits. Pour les conducteurs distraits, l'effet négatif de la double tâche n'était pas complètement compensé par l'alerte. Il est à noter que ces auteurs n'ont pas utilisé une tâche distractive visuelle ou visuo-motrice mais une tâche purement cognitive de type résolution de problèmes.

Par ailleurs, d'autres études sur simulateur se sont attachées à montrer les effets bénéfiques des systèmes d'alerte anti-collision mais uniquement sur des groupes de participants distraits. Là encore, les tâches distractives étaient essentiellement à caractère visuel. Par exemple, les résultats de Maltz et Shinar (2007) ont montré que les participants distraits par une tâche visuelle qui conduisaient avec l'aide d'un signal avertisseur auditif, passaient plus de temps avec des marges de sécurité plus sûres (> 1 seconde) et moins avec des marges moins sûres (< 1 seconde) que les participants qui ne disposaient pas du système. De même, Chun et al. (2012) ont trouvé que la présence d'un signal tactile aidait les participants distraits par une tâche visuo-motrice à réagir plus rapidement aux décélérations brusques du véhicule précédent et à éviter plus d'accidents que lorsque le signal n'était pas disponible. Enfin, Kiefer et al. (2005) ont montré le bénéfice d'un système anti-collision composé d'un signal auditif et visuel dans des conditions de conduite plus réalistes (sur piste). Cependant, et de façon intéressante leurs résultats dépendaient du type de tâche secondaire réalisée par les participants. En effet, le système était efficace lorsque les participants réalisaient une tâche de distraction visuo-motrice. En revanche, le système n'a pas montré d'effets positifs lorsque les participants réalisaient une tâche de distraction cognitive n'impliquant pas de détourner du regard de la route.

D'autre part, l'efficacité du signal avertisseur pourrait être également affectée par le niveau de difficulté de la tâche de distraction et de la situation de conduite. En effet, une tâche secondaire coûteuse en attention pourrait compromettre l'efficacité d'un signal avertisseur si son traitement n'est pas automatisé et ceci d'autant plus que la situation de conduite est complexe. Ainsi, les expériences de Mohebbi et al. (2009) et de Bueno, et al. (2014) sont particulièrement intéressantes car elles montrent que les bénéfices d'une alerte signalant un

risque de collision peuvent varier en fonction de la modalité du signal et du niveau de ressources attentionnelles demandées par la tâche secondaire. Ainsi Mohebbi et al. (2009) ont analysé l'efficacité de deux signaux avertisseurs différents, un auditif et un autre tactile, en utilisant une tâche de distraction cognitive. De plus, deux niveaux de difficulté de la double tâche (conversation simple et complexe) ont été manipulés. Leurs résultats ont montré que lorsque les participants étaient engagés dans une tâche plus coûteuse en ressources attentionnelles, le signal tactile était efficace mais pas le signal auditif. De plus, seul le signal tactile a éliminé complètement l'effet négatif en condition de distraction simple. Plus récemment, Bueno et al. (2014) ont examiné si le signal avertisseur nécessitait des ressources attentionnelles pour être traité et donc pour être efficace. Pour cela, ces auteurs ont également utilisé deux niveaux de difficulté d'une tâche distractive cognitive de type résolutions de problèmes. Les résultats ont mis en évidence un effet délétère sur la performance des participants que ce soit avec la tâche de distraction facile ou difficile. Cependant, l'effet négatif de la tâche de distraction facile a été partiellement compensé par la présence d'un signal avertisseur auditif, les performances montrant toujours un bénéfice par rapport à la ligne de base (sans système et sans distraction). En revanche, avec la tâche de distraction difficile, le système n'a pas permis d'améliorer les performances par rapport à la ligne de base. Ces résultats suggèrent donc qu'une alerte auditive nécessite une part de ressources attentionnelles pour être traitée.

Au vu de ces résultats, il semble que selon le type de tâche secondaire et donc la quantité de ressources attentionnelles disponible, différents signaux d'avertissement n'aient pas les mêmes effets.

4. Confort/Inconfort, stress et confiance dans le système d'alerte anti-collision

La confiance que les conducteurs portent au système d'aide à la conduite est une question importante qu'il ne faut pas éluder. Si ce système n'apporte pas une confiance suffisante ou, à tout le moins, dégage un certain stress lors de son utilisation, il est fort probable que le système impacte de manière négative les performances de conduite voire même que les conducteurs envisagent de ne plus l'utiliser. La confiance que les conducteurs ont envers le système est primordiale surtout lors de la gestion des situations à risque (voir Amalberti,

1996 ; Cahour & Forzy, 2009). La confiance envers le système est une construction qui s'opère dès la présentation du système au conducteur mais aussi lors de son utilisation. La qualité et la quantité des alertes fournies par le système aident l'utilisateur à se construire une représentation du système mais peuvent aussi impacter de manière positive (sensation de confort, bien-être) ou négative (stress, inconfort, défiance) la conduite. Il est donc important que les concepteurs de ces systèmes 1) estiment le bon critère de sensibilité et 2) estiment le meilleur moment pour délivrer une alerte afin de réduire le nombre des alertes inappropriées tout en laissant suffisamment de temps au conducteur pour répondre aux potentiels dangers. Il est fort probable que ces critères varient selon la fonction du système d'alerte envisagé. La prise en compte de l'état de stress du conducteur, de sa perception de confort/inconfort et confiance/défiance lors de l'utilisation du système est donc non négligeable.

De plus, il est possible que les avertissements tardifs soient source de stress chez l'utilisateur. En effet, de telles alertes nécessitent un effort d'adaptation de la part du conducteur et peuvent donc, de facto, représenter un événement stressant (Lazarus & Folkman, 1984). Par exemple, le conducteur peut juger comme stressante une alerte donnée trop tôt puisqu'il estimera qu'elle ne correspond pas à la situation qu'il perçoit. Le problème est que le conducteur, s'il évalue ces situations comme stressantes, mettra en place une stratégie de coping, c'est-à-dire une stratégie lui permettant de faire face à l'élément déclencheur (Matthews, et al., 2003). L'une des stratégies de coping (centrée sur l'émotion) pourrait être de changer la représentation de l'élément déclencheur (Sander & Scherer, 2009) comme ne plus apporter de confiance envers le système (car source d'anxiété voire de peur). Une autre stratégie de coping, cette fois centrée sur le problème (Sander & Scherer, 2009) serait de modifier la relation que le conducteur entretient avec l'élément stressant en agissant directement sur la situation. Dans ce cas, le conducteur pourra, par exemple, ralentir ou prêter plus d'attention à la tâche. Une évaluation des différences en termes de stress en fonction de la présentation des alertes sera effectuée en mesurant les états de stress des participants et leur niveau de confiance portée envers le système.

5. Adaptation

Lorsque l'on s'intéresse aux assistances à la conduite, il faut aussi considérer la question de l'adaptation comportementale à ces systèmes. En effet l'introduction des systèmes

d'assistance induit un changement de la tâche de conduite et les conducteurs doivent s'adapter progressivement à l'usage de ces systèmes. Or si ces systèmes visent une amélioration de la sécurité ou du confort, il semble qu'ils puissent amener des comportements des usagers non attendus qui peuvent réduire les bénéfices espérés. Par exemple, les conducteurs pourraient s'engager dans plus de tâches secondaires ou accorder trop de confiance au système et donc adopter plus de comportements à risque ou devenir vulnérables en cas d'urgence. L'adaptation à ces systèmes et son implication sur la sécurité routière est ainsi un problème complexe qui est encore mal compris. Elle dépend à la fois du système d'assistance envisagé (guidage, navigation, contrôle de trajectoire...) et des caractéristiques du conducteur (style de conduite, traits de personnalité...). Les conducteurs modifient donc leurs comportements pour s'adapter aux changements de leur environnement, y compris ceux introduits par une nouvelle assistance. Les changements de comportement peuvent apparaître au cours des premiers contacts avec le système (phase d'apprentissage) lorsque les conducteurs apprennent comment fonctionne le système, mais aussi après une longue période d'exposition (phase d'intégration) une fois que les conducteurs ont acquis un plus grand niveau d'expérience avec le système (Saad et al., 2004).

Concernant l'usage des systèmes anti-collision, en général les études montrent un effet positif global du système caractérisé par une diminution des collisions, une réduction du temps de réaction ou une augmentation de la distance inter-véhiculaire. De plus, il semble que les conducteurs ne montrent pas plus d'engagement dans des tâches secondaires lorsqu'ils conduisent avec le système. Par exemple, Kidd et al. (2010) ont demandé aux participants de conduire à l'aide d'un système d'alerte anti-collision en même temps qu'ils réalisaient une tâche secondaire visuo-motrice (taper des séquences de chiffres précédemment données sur un écran). Ces auteurs ont constaté que, contrairement à la période antérieure au déclenchement du signal avertisseur, les participants ayant reçu un signal ont pris plus de temps à initier de nouveau la tâche secondaire, ainsi qu'à valider leurs réponses. De plus, Muhrer et al. (2012) ont conclu à partir d'une étude réalisée dans un simulateur de conduite que conduire avec un système anti-collision (signal avertisseur plus freinage autonome) n'incite pas plus les conducteurs à s'engager dans une tâche secondaire. L'analyse des mouvements oculaires ainsi que celle des temps de réaction et du nombre de réponses à la tâche secondaire n'ont montré aucune différence entre les participants qui ont conduit avec et sans le système.

Jusqu'ici tout semble indiquer que le système n'a pas d'effets négatifs dans la conduite. Toutefois, rappelons que l'adaptation au système peut être affectée par certaines

caractéristiques de celui-ci (e.g., le moment de déclenchement du signal avertisseur, le niveau de fiabilité, etc.) et du conducteur (e.g. état attentionnel du conducteur) comme il a été montré précédemment. De plus, d'autres facteurs peuvent également influencer l'adaptation comportementale à ces systèmes, comme les attitudes et traits de personnalité et même les attentes que les conducteurs ont en ce qui concerne le comportement du véhicule précédent.

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

Finalement, les attentes des conducteurs, en ce qui concerne le comportement du véhicule précédent, peuvent également influencer leur propre comportement. La plupart des collisions par l'arrière se produisent dans des circonstances de trafic « normales » (ligne droite, trafic fluide, etc.) dans lesquelles il est difficile de prévoir un freinage soudain du véhicule précédent. Cela a conduit Muhrer et Vollrath (2010) à penser que les conducteurs pourraient ne pas maintenir des marges de sécurité adaptées à chaque situation, car l'attente d'un freinage brusque du véhicule précédent est très faible. Cependant, si les conducteurs ont été précédemment exposés à un nombre élevé de décélérations du véhicule précédent, ils

pourraient modifier leur comportement et réagir de manière plus sécuritaire (voir par exemple, Abe et al., 2011; Lee et al., 2002; Muhrer & Vollrath, 2010; Muhrer et al., 2012).

Il convient de souligner que, contrairement à la vie réelle, la plupart des études présentées ci-dessus ont analysé l'adaptation au système suite à de courtes périodes de conduite et avec un grand nombre de répétitions des événements critiques. De plus, l'effet dû à l'introduction du système (phase d'apprentissage) n'est pas directement mesuré car l'ordre de présentation des conditions avec et sans système est souvent contrebalancé. Par conséquent, à l'heure actuelle, la façon dont les conducteurs adaptent leur comportement au système lors des premières utilisations (phase d'apprentissage), mais aussi après une utilisation plus prolongée (phase d'intégration) nécessite d'être mieux étudiée.

Une seule étude à notre connaissance a été réalisée en vue d'examiner l'effet à long terme d'un système d'alerte anti-collision sur le comportement de conduite (Ben-Yaacov et al., 2002). Dans cette étude, les participants devaient conduire dans des conditions réelles de circulation au cours de 4 périodes : avec le système (2^{ème} période) et sans (1^{ère} et 3^{ème} périodes et 4^{ème} période six mois plus tard). Les conducteurs ont adopté des marges de sécurité plus importantes immédiatement après l'exposition au système (3^{ème} période). Fait intéressant, cet effet a également été observé six mois plus tard, lorsque les participants ont de nouveau été exposés au même circuit et sans l'assistance du système d'alerte.

Ce dernier résultat a mis en évidence l'importance d'évaluer comment les conducteurs pourraient réagir si le système n'est plus disponible (par exemple, par un dysfonctionnement du système) aussi bien après une courte période d'utilisation du système qu'après une longue période d'utilisation. Si les conducteurs sont devenus dépendants de l'aide du système, ils pourraient être très vulnérables en cas de dangers potentiels si le système n'est plus disponible. Toutefois, si les conducteurs considèrent le système comme un assistant et non comme un substitut du conducteur, ils pourraient être capables de transférer l'effet positif du système, même quand il n'est plus disponible comme dans l'étude de Ben-Yaacov et collaborateurs. Dans ce même cadre, Bueno et al. (2014) ont récemment étudié l'adaptation comportementale à un système signalant des risques de collisions au moyen d'une alerte sonore ainsi que les conséquences de l'arrêt du système après cette adaptation. Pour cela, les participants ont conduit un simulateur de conduite au cours de 3 phases successives : 1) sans le système (ligne de base) ; 2) avec le système; et 3) sans le système. Les résultats de cette étude ont montré que les conducteurs adaptaient positivement leur comportement dès l'introduction du système. Ce résultat perdurait à court terme si les conducteurs n'étaient pas distraits par des tâches secondaires coûteuses en ressources attentionnelles. En revanche, contrairement à l'étude de Ben-Yaacov et al. (2002), aucun effet de transfert positif lorsque le système était rendu inactif n'a été observé.

Du fait du manque d'études ayant évalué l'adaptation comportementale au système anti-collision à long terme il est difficile de tirer des conclusions définitives sur ce sujet. Toutefois, il est intéressant de constater que parmi les études qui ont été présentées ici, aucun effet négatif d'adaptation comportementale au système n'a été mis en évidence.

CHAPITRE 2 - APPORT DU PROJET ACT

1. Objectifs

La première partie du projet ACT financé par la Fondation Sécurité Routière avait pour objectif d'examiner l'impact de l'usage d'un système d'alerte anti-collision (sans freinage autonome) en prenant en compte :

- Le niveau de fiabilité des systèmes
- L'état attentionnel des conducteurs
- Le moment de déclenchement de l'alerte par rapport au risque de collision

Cet effet a été observé sur :

- Le comportement du conducteur
- Le stress induit par le système
- L'efficacité du système
- L'acceptabilité du système
- L'adaptation comportementale au système

2. Approche expérimentale

Pour cela, 2 expérimentations ont été réalisées sur simulateur. L'usage d'un système d'alerte anti-collision a été mimé via l'utilisation d'une alerte sonore retentissant afin de signaler un risque de collision (système). Nous avons manipulé le taux de risques de collision signalés par l'alerte (fiabilité) dans la première expérimentation et le moment de déclenchement de l'alerte dans la seconde. Dans chaque expérimentation, nous avons fait varier l'état attentionnel des participants au moyen d'une tâche distractive d'ordre cognitif.

a. Simulateur de conduite

Les expérimentations ont été réalisées sur le simulateur de conduite du LEPSIS à Bron (Figure 1).

Ce simulateur est composé d'une cabine à base fixe (Peugeot 308) instrumentée d'une part à l'aide de capteurs installés sur les organes de commande et d'autre part grâce au bus de communication de la voiture (bus CAN) permettant le traitement des informations du tableau de bord.

L'image de la scène routière est projetée à l'avant sur 5 écrans (220x165 cm) représentant un champ visuel total de 180° en horizontal et 40° en vertical. Pour la vue arrière, 3 écrans se reflétant dans les rétroviseurs sont utilisés. Un son en quadriphonie est diffusé dans la cabine – bruits internes au véhicule (moteur, roulement, démarreur) et bruits externes spatialisés du trafic.



Figure 1 : Simulateur de conduite du LEPSIS

Le simulateur est basé sur l'architecture SIM2, qui s'appuie sur le modèle de trafic ARCHISIM du LEPSIS. SIM2 intègre des outils d'aide pour la création des différents composants informatiques (bases de données ou fichiers) nécessaires à la description de l'environnement et du déroulement des expérimentations (scénarios).

b. Données recueillies

Différents types de mesures ont permis d'évaluer l'efficacité et l'acceptabilité de l'alerte sonore signalant un risque de collision ainsi que de mieux connaître les caractéristiques des participants.

Données subjectives

Afin d'examiner l'état de stress induit par l'utilisation de ces systèmes, l'ensemble des participants ont rempli le questionnaire d'auto-évaluation (STAI-Y forme A, état) développé par Spielberger et al. (1993).

De plus, une échelle d'acceptation (Van der Loan, et al., 1997) en 5 points (de -2 à 2) a été proposée aux participants. Elle se compose de 9 items et permet d'estimer l'acceptation du système selon 2 dimensions : l'utilité et la satisfaction.

Paramètres physiologiques

En complément des données subjectives et afin d'estimer la variabilité du rythme cardiaque qui constitue un indice objectif du niveau de stress ressenti (Salahuddin et al., 2007 ; Melillo et al., 2011) et de la charge mentale au cours de l'expérience, le rythme cardiaque a été enregistré.

Paramètre comportementaux

Les performances des participants dans les tâches de conduite sur simulateur ont été évaluées au moyen de différentes données objectives :

- Temps de réponse à l'accélérateur : moment où le participant lève le pied de l'accélérateur suite à la décélération du véhicule précédent,
- Temps de réponse au frein : moment où le participant pose le pied sur le frein suite à la décélération du véhicule précédent,
- Temps à la collision : correspond à la distance entre le véhicule précédent et celui du participant divisée par la différence de vitesse au moment où le participant freine,
- Temps inter-véhiculaire : correspond à la distance entre le véhicule précédent et celui du participant divisée par la vitesse du véhicule du participant au moment du freinage.
- Vitesse moyenne au cours du scénario

c. Tâche principale sur simulateur de conduite

La situation de conduite était un suivi de véhicule dans le brouillard sur route nationale (vitesse de consigne : 90km/h). Le véhicule de devant freinait de façon répétée et le participant devait réagir dès que cela lui semblait nécessaire pour éviter une éventuelle collision. Le contexte brouillard permettait de mieux accepter les freinages fréquents du véhicule précédent.

Afin d'examiner les processus d'adaptation à court terme, les expérimentations ont été divisées en 3 sessions de conduite successives correspondant à 5 scénarios de conduite au total :

- Session 1 : dans un premier temps, les participants conduisaient sans assistance à la conduite (situation référence) le temps d'un scénario de conduite.
- Session 2 : ensuite, une phase de conduite était réalisée avec un système anti-collision (phase d'apprentissage). Le taux de risques de collisions signalé par l'alerte et le type d'erreur (fausse alarme ou défaut de détection) variaient selon le groupe de sujets. Cette session était composée de 3 scénarios de conduite. Dans l'un de ces scénarios, une tâche distractive était proposée aux participants.
- Session 3 : enfin, les participants conduisaient de nouveau sans système au cours d'un scénario, afin de déterminer l'impact de l'arrêt du système (changement de véhicule pour un véhicule non équipé ou panne système) après une période de familiarisation préalable au système.

e. Tâche secondaire

Afin de moduler l'état attentionnel des participants, nous avons utilisé une tâche secondaire de type résolutions de problèmes induisant une réorientation de l'attention vers une réflexion interne au détriment de la tâche de conduite. La tâche retenue permet un contrôle de l'engagement du sujet dans une activité cognitive concurrente à la conduite. Il s'agit de la tâche dite du mot mystère. Cette tâche consiste à donner au sujet 3 mots sans lien sémantique et à lui demander de générer un 4^{ème} mot associé à chacun des 3 mots de l'énoncé. Cette association peut correspondre à une association sémantique, à une association dans une expression ou dans un mot-composé ou encore une synonymie.

Par exemple

Énoncé :	collier	réaction	télévision
Solution :		chaîne	
Type d'association :	synonyme	expression	association sémantique

L'intérêt de cette tâche est qu'elle n'implique pas de détourner le regard de la route. De plus, différents niveaux de difficulté peuvent être créés. Dans le cadre de ces études nous avons volontairement choisi un niveau de difficulté intermédiaire. Pour cela, nous avons adapté le niveau de difficulté de la tâche à chaque participant afin qu'ils soient capables de répondre à au moins 60% des énigmes au cours du scénario.

3. Expérience 1

a. Objectifs et protocole

L'expérience 1 portait sur l'impact du niveau de fiabilité du système sur le comportement de conduite des sujets distraits ou non et sur l'adaptation comportementale.

60 sujets ont participé à cette étude. Ils étaient répartis aléatoirement en 5 groupes de 12 participants (Tableau 1).

Avant de débiter l'expérience proprement dite, et pour se familiariser avec le simulateur de conduite, tous les participants étaient invités à conduire le temps d'un scénario d'entraînement de 10 min.

Ensuite les participants étaient confrontés aux 3 sessions de conduite (5 scénarios). Chaque scénario durait environ 10 min. Au cours de chaque scénario, le nombre de répétitions des collisions potentielles était fixé à 14.

Lors de la session 2 (apprentissage), chaque groupe était entraîné avec un système particulier pouvant varier sur son niveau de fiabilité (70% ou 90 % des risques de collisions signalés par l'alerte) et le type d'erreurs auquel il était le plus sujet (fausses alertes – FA, et non détection - ND). Seul le groupe 5 qui constituait notre groupe contrôle conduisait toujours sans système afin d'évaluer l'impact de la familiarisation à la conduite sur simulateur et l'effet de la fatigue. Par ailleurs l'impact de l'état attentionnel des sujets sur l'efficacité de

l'alerte était évalué au moyen de la tâche secondaire décrite plus haut et proposée aux participants au cours du scénario 3.

Tableau 1 : Différenciation des groupes selon la période d'apprentissage (avec et sans système)

Groupes	Session 1	Session 2 (apprentissage)			Session 3
	Scénario 1	Partie 1 Scénario 2	Partie 2 Scénario 3	Partie 3 Scénario 4	Scénario 5
75FA (21 % FA -4% ND)	Sans système	Système 75FA	Système 75FA + distraction	Système 75FA	Sans système
75ND (21 % ND – 4% FA)		Système 75ND	Système 75ND + distraction	Système 75ND	
90FA (8% FA- 2% ND)		Système 90FA	Système 90FA + distraction	Système 90FA	
90ND (8% ND – 2% FA)		Système 90ND	Système 90ND + distraction	Système 90ND	
SS		Sans système	Sans système + distraction	Sans système	

L'alerte était déclenchée 500 ms après que la voiture précédente ait commencée à décélérer.

b. Résultats

Effets généraux

L'analyse de variance a permis de mettre en évidence un effet significatif du type de système (75-FA, 75-ND, 90-FA, 90-ND, SS), un effet des scénarios (1 à 5) et des interactions sur les TR à l'accélérateur, les TR à l'appui sur le frein, sur les TTC et les TIV. Concernant la vitesse, seul un effet des scénarios a été mis en évidence (Tableau 2).

Tableau 2 : effets principaux sur TR à l'accélérateur, TR au frein, TTC, TIV et vitesse

	Effet système	Effet scénarios	Interaction
TR accélérateur	F(4,55)=4,31 p=0,0042	F(4,220)=92,15 p<0,00001	F(16,220)=3,79 p<0,00001
TR frein	F(4,55)=5,85 p=0,0005	F(4,220)=96,31 p<0,00001	F(1,16)=3,61 p<0,00001
TTC	F(4,55)=4,57 p=0,002974	F(4,220)=61,67 p<0,00001	F(1,16)=3,04 p<0,000125
TIV	F(4,55)=4,04 p=0,00606	F(4,220)=52,25 p<0,00001	F(1,16)=2,91 p<0,00023
Vitesse	-	F(4,220)=22,17 P<0,00001	-

La figure 2 illustre les résultats obtenus pour les 5 variables d'intérêt au cours des 5 scénarios successifs et selon le groupe.

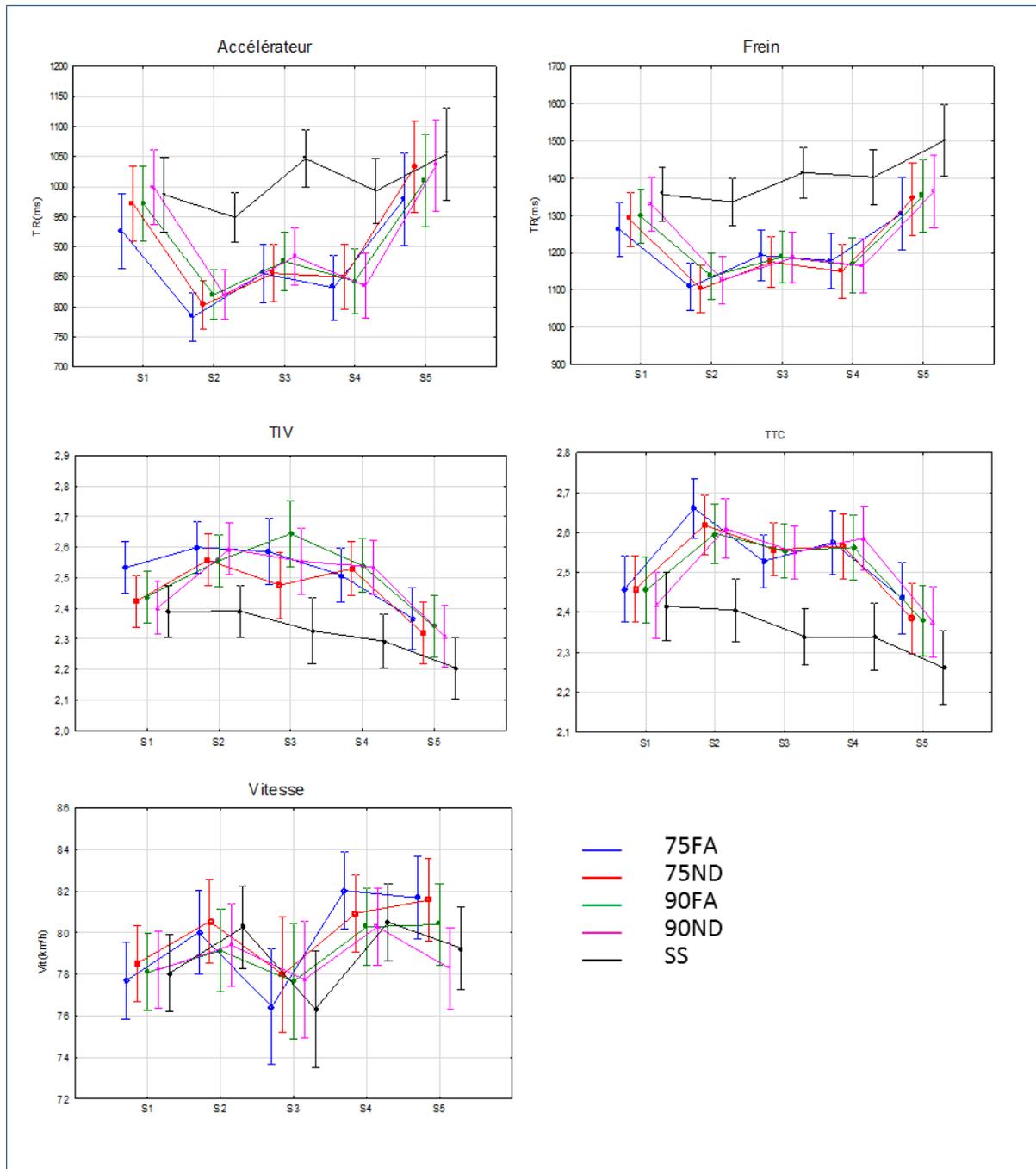


Figure 2 : représentation graphique des performances de conduite (TR accélérateur, TR frein, TIV, TTC, vitesse) au cours des 5 scénarios de conduite (S1 à S5) pour les 5 groupes expérimentaux (75FA, 75ND, 90FA, 90ND, SS).

Les tableaux 3 à 7 présentent les résultats statistiques des comparaisons planifiées entre les scénarios de conduite pour les TR à l'accélérateur, au frein, les TTC, les TIV et la vitesse.

Introduction du système (S1 vs S2)

Les comparaisons planifiées ont mis en évidence que l'introduction du système lors du scénario 2 avait pour conséquence une diminution des TR à l'accélérateur et à l'appui sur le frein ainsi qu'une augmentation des TTC et des TIV quel que soit le système (Tableau 3). Une augmentation de la vitesse est également observée entre S1 et S2 pour les groupes conduisant avec un système fiable à 75% et le groupe conduisant avec le système fiable à 90% propice aux fausses alertes.

Comme attendu, le groupe contrôle ne présente aucune différence entre le scénario 1 et le scénario 2. Par ailleurs, nous n'avons pas pu mettre en évidence de différence entre les systèmes fiables à 75% et ceux fiables à 90% sur les 5 variables étudiées.

Tableau 3 : S1-S2

	75FA	75ND	90FA	90ND	SS
TR acc (ms)	930.9 vs 783,8 F=34.37 P=0,000000	977,4 vs 806,8 F=47.87 p=0,000000	965,7 vs 818,2 F=38.06 P=0,000000	1005,6 vs 936,8 F=53.48 P=0,000000	971,6 vs 834,4 -
TR frein (ms)	1267,1 vs 1112,7 F=44.6 P=0,000000	1294 vs 1100,1 F=66.42 P=0,000000	1287,6 vs 1127,3 F=49.19 P=0,000000	1339 vs 1133,8 F=79.08 P=0,000000	1345,4 vs 1319,3 -
TTC (s)	2,47 vs 2,65 F=36.21 P=0,000000	2,45 vs 2,61 F=22.72 P=0,000015	2,45 vs 2,61 F=18.11 P=0,000083	2,39 vs 2,6 F=33.03 P=0,000000	2,4 vs 2,43 -
TIV (s)	2,53 vs 2,6 F=4.67 P=0.035127	2,42 vs 2,56 F=18.94 P=0.000059	2,45 vs 2,56 F=14.42 P=0.000368	2,39 vs 2,58 F=38.45 P=0.0000008	2,39 vs 2,4 -
Vitesse (km/h)	77,7 vs 80 F=6,56 P=0,013199	78,5 vs 80,5 F=4,92 P=0,030637	78,1 vs 80,2 F=5,78 P=0,019616	78,2 vs 79,4 -	78,1 vs 79,1 -

Efficacité des systèmes lorsque les participants sont distraits (S2 vs S3 et S1 vs S3)

Concernant l'impact de la double tâche (DT), nous avons comparé les résultats obtenus entre le scénario 2 et le scénario 3 (Tableau 3) ainsi qu'entre les scénarios 1 et 3 (Tableau 4).

Quel que soit le groupe, la DT augmente les TR à l'accélérateur et au frein entre les scénarios 2 et 3. De plus elle induit une diminution du TTC significative dans tous les

groupes excepté le groupe 90FA. On observe également une diminution du TIV pour le groupe 75ND et une augmentation du TIV pour le groupe 90FA dans le cas de la distraction.

Concernant la vitesse, les données montrent une diminution de la vitesse pour les 5 groupes lors de l'ajout de la tâche distractive. Toutefois, cette diminution n'est significative que pour les 2 groupes conduisant avec un système fiable à 75% et le groupe conduisant avec un système fiable à 90% et propice aux fausses alertes.

Tableau 4 : S2-S3

	75FA	75ND	90FA	90ND	SS
TR acc (ms)	783,8 vs 856,5 F=15.46 P=0,000238	806,8 vs 859,2 F=8.19 P=0,005954	818,2 vs 876,9 F=9.03 P=0,003986	936,8 vs 881,9 F=11.86 P=0,001105	834,4 vs 1042 F=27.96 P=0,000002
TR frein (ms)	1112,7 vs 1187,3 F=16.92 P=0,000132	1100,1 vs 1175,6 F=12.67 P=0,000773	1127,3 vs 1180,8 F=6.34 P=0,014707	1133,8 vs 1186,7 F=8.33 P=0,005571	1319,3 vs 1409,6 F=15.03 P=0,000284
TTC (s)	2,65 vs 2,52 F=21.18 P=0,000026	2,61 vs 2,54 F=4.51 P=0,038285	2,61 vs 2,55 -	2,6 vs 2,55 F=4.30 P=0,042869	2,43 vs 2,32 F=4.93 P=0,030680
TIV (s)	2,6 vs 2,6 -	2,56 vs 2,46 F=4.68 P=0.034817	2,56 vs 2,62 F=5.43 P=0.023513	2,58 vs 2,55 -	2,4 vs 2,32 -
Vitesse (km/h)	80 vs 76,4 F=8,92 P=0,004197	80,5 vs 78 F=4,54 P=0,037557	80,2 vs 76,3 F=10,75 P=0,00181	79,4 vs 77,7 -	79,1 vs 77,6 -

Malgré l'augmentation des TR, le fait d'avoir un système lorsque l'on est distrait permet toutefois de conserver des TR plus courts que sans système même sans distraction. Ainsi les TR à l'accélérateur et au frein restent significativement plus courts dans le scénario 3 que dans le scénario 1 et ceci quel que soit le système alors qu'ils sont significativement plus longs dans le groupe contrôle (Tableau 5).

Concernant les TTC, la présence du système dans le scénario 3 permet de conserver des TTC plus grands que dans le scénario 1 (sans système sans distraction) excepté pour le groupe 75FA. Le groupe contrôle (sans système) présentent lui des TTC plus courts en présence de la distraction (scénario 3) que sans distraction (scénario 1).

Enfin, pour les TIV, les résultats révèlent des TIV plus longs avec système que sans. Toutefois ce résultat n'est significatif que pour les systèmes fiables à 90%.

Nous noterons également que dans le scénario 3, les TIV sont plus longs pour les systèmes propices aux fausses alertes que pour les systèmes propices aux non-détections. Toutefois, cette différence n'atteint pas le seuil de significativité ($p=0,07$).

Tableau 5 : S1-S3

	75FA	75ND	90FA	90ND	SS
TR acc (ms)	930,9 vs 856,5 F=7.47 P=0,008402	977,4 vs 859,2 F=20.17 P=0,000037	965,7 vs 876,9 F=13.56 P=0,000529	1005,6 vs 881,9 F=19.8 P=0,000042	971,6 vs 1042 F=5.43 P=0,023468
TR frein (ms)	1267,1 vs 1187,3 F=6.31 P=0,014985	1294 vs 1175,6 F=17.21 P=0,000117	1287,6 vs 1180,8 F=15.8 P=0,000207	1339 vs 1186,7 F=27.75 P=0,000002	1345,4 vs 1409,6 F=4.61 P=0,036164
TTC (s)	2,47 vs 2,52 -	2,45 vs 2,54 F=7.52 P=0,008248	2,45 vs 2,55 F=7.65 P=0,007759	2,39 vs 2,55 F=13.68 P=0,000509	2,4 vs 2,32 F=4.19 P=0,045532
TIV (s)	2,53 vs 2,6 -	2,42 vs 2,46 -	2,45 vs 2,62 F=20.32 P=0,000035	2,39 vs 2,55 F=11.00 P=0,001618	2,39 vs 2,32 -
Vitesse (km/h)	77,7 vs 76,4 -	78,5 vs 78 -	78,1 vs 76,3 -	78,2 vs 77,7 -	78,1 vs 77,6 -

Système inactif et effet de transfert (S4 vs S5 et S1 vs S5)

Lorsque les participants conduisent avec le système inactif (scénario 5) après une période de conduite avec le système actif, les TR à l'accélérateur et au frein augmentent (Tableau 6). De plus les TTC et les TIV diminuent. Toutefois, ces résultats sont aussi vrais pour le groupe sans système.

Par ailleurs, les participants diminuent significativement leur vitesse lors de la mise à l'arrêt des systèmes lorsqu'ils roulaient au préalable avec un système fiable à 90% ($F(1,55)=10,63$; $p=0,0019$). Ce n'est pas le cas pour les systèmes fiables à 75% ($F(1,55)=0,08$; $p=0,77$).

Tableau 6 : S4-S5

	75FA	75ND	90FA	90ND	SS
TR acc (ms)	833,8 vs 978,6 F=28.13 P=0,000002	850 vs 1028 F=43,67 P=0,000000	845,4 vs 1013,2 F=36.3 P=0,000000	831,7 vs 1024,1 F=51.62 P=0,000000	992,3 vs 1012,7 F=4.85 P=0,031920
TR frein (ms)	1177,5 vs 1307,5 F=19.00 P=0,000058	1146,7 vs 1336,7 F=44.47 P=0,000000	1161,2 vs 1348,5 F=40.72 P=0,000000	1167 vs 1350,6 F=46.20 P=0,000000	1399,6 vs 1456,6 F=11.22 P=0,001469
TTC (s)	2,56 vs 2,44 F=22.75 P=0,000014	2,59 vs 2,39 F=38.13 P=0,000000	2,56 vs 2,38 F=39.41 P=,000000	2,57 vs 2,39 F=51.12 P=0,000000	2,34 vs 2,29 F=6.32 P=0,014975
TIV (s)	2,51 vs 2,37 F=15.75 P=0.000212	2,54 vs 2,33 F=35.6 P=0.000000	2,54 vs 2,34 F=31.73 P=0.000001	2,53 vs 2,32 F=41.37 P=0.0000003	2,29 vs 2,25 F=6.06 P=0.017028
Vitesse (km/h)	82 vs 81,7 -	80,9 vs 81,6 -	80,5 vs 79,2 (0,083)	80,3 vs 78,3 F=8,11 P=0,006183	80,3 vs 79,1 -

Afin d'examiner les effets de transfert potentiels, nous avons comparé les mesures obtenues dans les scénarios 1 et 5 (Tableau 7). Le groupe contrôle qui a conduit sans système de bout en bout présentent un allongement des TR à l'accélérateur et au frein ainsi qu'une diminution des TTC et TIV.

Tableau 7 : S1-S5

	75FA	75ND	90FA	90ND	SS
TR acc (ms)	930.9 vs 978,6 -	977,4 vs 1028 F=4,41 P=0,040210	965,7 vs 1013,2 -	1005,6 vs 1024,1 -	971,6 vs 1012,7 F=5,53 P=0,022291
TR frein (ms)	1267,1 vs 1307,5 -	1294 vs 1336,7 -	1287,6 vs 1348,5 -	1339 vs 1350,6 -	1345,4 vs 1456,6 F=19.31 P=0,000051
TTC (s)	2,47 vs 2,44 -	2,45 vs 2,39 F=5.47 P=0,023042	2,45 vs 2,38 F=5.59 P=0,021701	2,39 vs 2,39 -	2,4 vs 2,29 F=21.09 P=0,000027
TIV (s)	2,53 vs 2,37 F=18.00 P=0.000085	2,42 vs 2,33 F=7.3 P=0.009152	2,45 vs 2,34 F=6.36 P=0.014619	2,39 vs 2,32 F=6.00 P=0.017536	2,39 vs 2,25 F=22.24 P=0.000017
Vitesse (km/h)	77,7 vs 81,7 F=16,23 P=0,000174	78,5 vs 81,6 F=9,47 P=0,003253	78,1 vs 79,2 -	78,2 vs 78,3 -	78,1 vs 80,4 F=5,32 P=0,024896

Concernant les groupes avec systèmes, seul le groupe 75ND présente un allongement des TR à l'accélérateur entre les scénarios 1 et 5. Tous les groupes présentent une diminution du TTC, mais cette diminution n'est significative que dans les groupes 75ND et 90FA. De la même façon, tous les groupes présentent une diminution du TIV.

Pour la vitesse, une augmentation est observée pour l'ensemble des groupes entre le début et la fin de l'expérience. Cette différence n'est significative que pour les groupes ayant roulé avec un système fiable à 75% et pour le groupe contrôle. Une différence significative entre les groupes ayant roulé avec un système fiable à 75% et ceux ayant roulé avec un système fiable à 90% est d'ailleurs observé dans le scénario 5 ($F=8,443$; $p=0,005$) avec une vitesse plus importante pour ceux ayant roulé avec les systèmes fiables à 75%.

Données physiologiques

Suite à des problèmes techniques lors de l'enregistrement des données cardiaques (défaillance du système) ainsi qu'au bruit dans les données lors de certains enregistrements, nous n'avons malheureusement obtenus qu'un nombre restreint de fichiers de données exploitables. En effet seuls 6 sujets par groupes (soit 30 sujets) présentent des données exploitables. Pour ces raisons, les données cardiaques restent illustratives.

Nous avons observé que le rythme cardiaque diminuait progressivement au cours de 5 scénarios de conduite et ceci quel que soit le groupe considéré (Tableau 8).

Tableau 8 : Rythme cardiaque moyen (battement par minute) selon le groupe et le scénario

	S1	S2	S3	S4	S5
SS	81.3	78.1	77.7	74.1	71.9
75FA	80.8	77.4	77.9	76.5	75.1
75ND	71.7	68.6	68.1	66.1	66.6
90FA	76.8	75.0	75.1	74.9	74.0
90ND	85.8	82.3	85.7	79.8	78.6

Le tableau 9 rapporte les valeurs statistiques des comparaisons planifiées estimant les différences de rythme cardiaque entre scénarios dans les 5 groupes de participants.

De façon intéressante, dans le groupe contrôle, cette diminution est significative entre un scénario et le suivant excepté entre les scénarios 2 et 3. Il semble donc que l'introduction de la DT freine la diminution progressive du rythme cardiaque.

Tableau 9 : Données statistiques correspondant aux comparaisons du rythme cardiaque moyen entre 2 scénarios et selon les 5 groupes

	S1-S2	S2-S3	S3-S4	S4-S5	S1-S5
SS	F=9,25 P=0,005319	-	F=13,55 P=0,001068	F=9,63 P=0,00457	F=29,91 P=0,00001
75FA	F=10,44 P=0,003339	-	-	- (p=0,06)	F=10,82 P=0,002884
75ND	F=8,41 P=0,007497	-	- (p=0,06)	-	F=8,81 P=0,006356
90FA	F=6,52 P=0,016882	-	-	-	F=4,26 P=0,049203
90ND	F=11,06 P=0,002637	F=21,83 P=0,00008	F=34,93 P=0,000003	- (p=0,09)	F=17,59 P=0,000281

Pour les groupes avec systèmes, les données révèlent également une diminution du rythme cardiaque entre S1 et S5. Comme pour le groupe contrôle, lors de l'introduction de la double tâche (S3), le rythme cardiaque ne semble pas modifié, excepté pour le groupe roulant avec un système fiable à 90% et propice aux non-détections. En effet, pour ce groupe une augmentation du rythme cardiaque est observée.

Jugement d'utilité et de satisfaction

L'échelle d'acceptation développée par Van der Loan et al. (1997) permet d'estimer l'acceptation du système selon 2 dimensions : l'utilité et la satisfaction

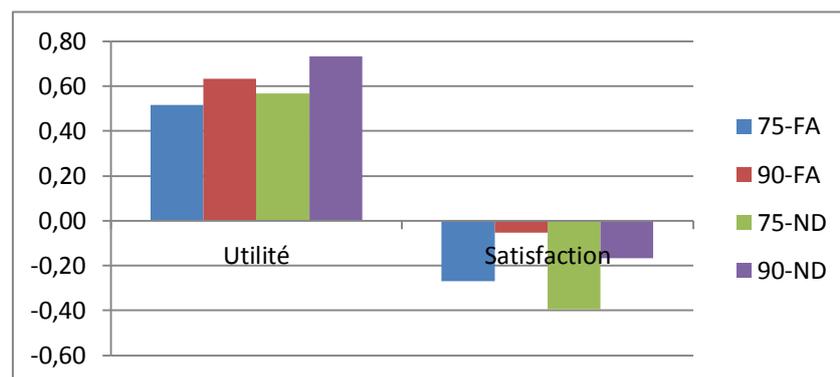


Figure 3 : scores d'utilité et de satisfaction selon le système utilisé.

Dans un premier temps, nous noterons que les scores de satisfaction sont très bas puisqu'en dessous de la moyenne pour l'ensemble des systèmes (Figure 3). Ceci est probablement dû aux conditions expérimentales qui impliquaient un grand nombre de confrontations à l'alerte. Par conséquent, cette alerte était perçue comme irritante pour un

certain nombre de participants. Malgré cela, les participants ont jugé que les systèmes étaient utiles.

Comme attendu, les systèmes fiables à 90% ont été perçus comme plus utiles et plus satisfaisants que les systèmes fiables à 75%. Les systèmes effectuant plus de non-détections ont été perçus comme moins satisfaisants quel que soit la fiabilité du système. Toutefois, nous n'avons pas observé de différences significatives entre les groupes.

Résultats obtenus pour le stress ressenti

Les résultats obtenus aux questionnaires STAI-Y mesurant l'état d'anxiété ont montré une grande variabilité intergroupes, et ce, dès l'entrée au laboratoire. Afin d'éviter des effets dus aux variabilités interindividuelles, très présentes dans l'utilisation de questionnaires introspectifs, nous avons fait le choix de baser les analyses statistiques des scores de stress sur l'évolution au cours du temps. Ainsi, nous avons pris la mesure du stress état effectuée après l'entraînement sur simulateur de conduite comme base de référence. Nous avons ensuite soustrait les scores obtenus après chaque scénario de conduite à ce score de référence (par exemple $S_2 - S_1 = \text{Var1}$) (voir Figure 4). De ce fait, nous enlevons les variations interindividuelles et nous basons nos analyses sur les variations de ces scores. Nous avons utilisé ce principe pour l'ensemble des analyses portées sur le stress ressenti tout au long de ce projet.

Les données ont été analysées selon une ANOVA avec la variable Système (75-ND, 75-FA, 90-ND, 90-FA et SS) en intergroupe et la variable Variation (Var1, Var2, Var3, Var4) en intragroupe.

Les analyses ont révélé un effet simple de la variable Variation ($F(3, 171) = 28.97, p < .0000$) et une interaction entre les variables Système et Variation ($F(12, 171) = 1.77, p < .05$).

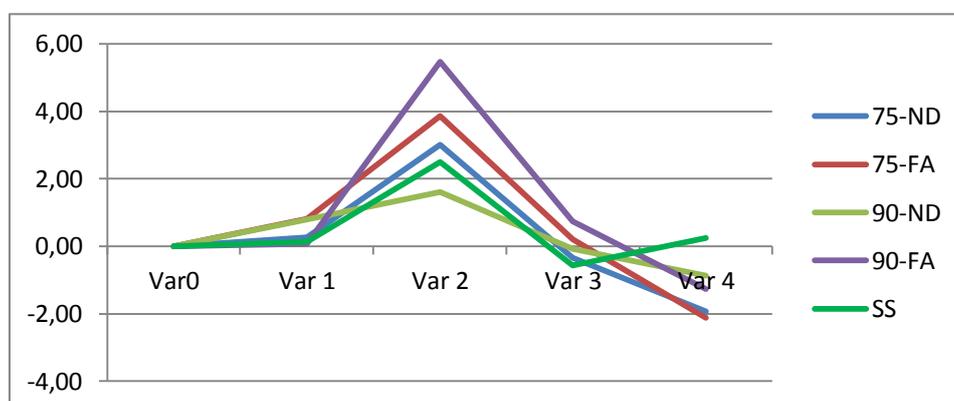


Figure 4 : Variation du score de stress ressenti en fonction du scénario et du groupe d'appartenance

Les analyses complémentaires ont montré des différences significatives de la **Variation 1 à la Variation 2** pour le système 75-ND; 75-FA et 90-FA (respectivement, $F(1, 57) = 3.96$, $p < .05$; $F(1, 57) = 5.33$, $p < .05$; $F(1, 57) = 18.24$, $p < .001$). De la **Variation 2 à la Variation 3**, les systèmes 75-ND, 75-FA, 90-FA et SS ont montré une différence significative dans les analyses (respectivement, $F(1, 57) = 7.10$, $p < .01$; $F(1, 57) = 9.21$, $p < .01$; $F(1, 57) = 16.93$, $p < .001$; $F(1, 57) = 6.82$, $p < .05$). De la **Variation 3 à la Variation 4**, les systèmes 75-ND, 75-FA et 90-FA montrent des différences significatives (respectivement, $F(1, 57) = 4.59$, $p < .05$; $F(1, 57) = 10.58$, $p < .01$; $F(1, 57) = 8.48$, $p < .01$). L'ensemble des systèmes ne diffèrent pas de la **Variation 1 à la Variation 3**. Au niveau de la Variation 2, le système 90-FA diffère du reste des systèmes ($F(1, 57) = 4.54$, $p < .05$).

c. Conclusion préliminaire

Dans une précédente expérimentation, nous avons mis en évidence que les systèmes signalant 75% des risques de collision (avec fausses alertes et non-détections) permettaient aux sujets distraits et non distraits d'être plus réactifs en cas d'obstacles (Bueno et al, 2014).

L'objectif de la présente étude était d'estimer l'influence de différents niveaux de fiabilité ainsi que de différents types d'erreurs du système (non détections et fausses alertes) sur l'efficacité et l'acceptabilité des systèmes.

Introduction du système (S2)

Lors de l'introduction du système, les résultats obtenus montrent que les 4 systèmes testés présentent un effet bénéfique chez les participants non distraits en ce qui concerne les temps de réaction (lever du pied de l'accélérateur et du frein) ainsi que les TTC et TIV. Les résultats révèlent également une augmentation de la vitesse pour les systèmes fiables à 75% et le système fiable à 90% propice aux fausses alertes. Etant donné que nous n'avons pas pu mettre en évidence une telle augmentation dans le groupe contrôle (sans système), on peut se demander si cette augmentation de la vitesse ne reflète pas la confiance que les participants ont envers le système : en se reposant sur le système, les participants s'autoriseraient à rouler légèrement plus vite. Toutefois, nous n'avons pas pu mettre en évidence de différence de vitesse lors de l'introduction du système fiable à 90% et propice aux non-détections. Nous noterons que contrairement à Yamada et Kuchar (2006), nous

n'avons pas observé de diminution de la vitesse avec les systèmes propices aux non-détections.

Concernant le stress ressenti, l'introduction des systèmes n'augmentent pas les scores déclarés. Par ailleurs nous n'avons pas observé d'augmentation du rythme cardiaque liée à l'introduction du système. Ces deux résultats suggèrent que les systèmes bien que perçus comme peu satisfaisant n'augmentent pas le stress des participants.

Effet de la distraction (S3)

Comme attendu, la tâche distractive provoque une augmentation des TR à l'accélérateur et au frein pour les 5 groupes entre le scénario 2 et le scénario 3. Une diminution du TTC est également observé pour tous les groupes, excepté le groupe conduisant avec le système fiable à 90% propice aux fausses alertes. Par ailleurs, le TIV augmente significativement dans ce groupe alors qu'il diminue dans les autres.

En comparaison de la situation de base (S1), les TIV sont plus longs avec les systèmes fiables à 90%.

Le stress ressenti révèle une augmentation du stress pour les 5 groupes lors de la tâche distractive. Les augmentations des scores de stress sont plus élevés pour le système fiable à 90% et propice aux fausses alertes.

Les systèmes fiables à 90% semblent donc plus efficaces que les systèmes fiables à 75% pour maintenir une distance de sécurité lorsque les conducteurs sont distraits. Notamment, le système fiable à 90% et propice aux fausses alertes semblent le plus intéressant en termes de sécurité. Toutefois, c'est celui qui provoque un score de stress le plus élevé. Une question se pose alors de savoir si ce stress n'est pas bénéfique pour la réactivité des usagers. En effet, la loi de Yerkes et Dodson stipule qu'il existe un lien entre le niveau d'éveil (vigilance/éveil cortical) et les performances. Les performances atteindraient un niveau optimum pour un niveau d'éveil modéré mais déclineraient lorsque ce niveau d'éveil devient trop élevé. Or ce niveau d'éveil serait lié au stress, ce qui pourrait expliquer nos résultats.

Par ailleurs, nous nous attendions à obtenir des corrélations entre le rythme cardiaque et le score de stress. Or, les données physiologiques, n'ont pas permis de mettre en évidence d'augmentation du rythme cardiaque lors de l'ajout de la double tâche, excepté pour le groupe conduisant avec un système fiable à 90% et propice aux non-détections. Il est possible que cette contradiction entre les données subjectives et les données cardiaques soit due au fait que nos données physiologiques ne portent que sur la moitié des

participants. Des études futures devraient permettre de mieux appréhender le lien entre rythme cardiaque et stress ressenti.

Mise à l'arrêt du système (S5)

Lors de la mise à l'arrêt du système plusieurs résultats intéressants concernant la vitesse, ont été observés. Tout d'abord, une augmentation progressive de la vitesse est observée pour l'ensemble des groupes entre le début et la fin de l'expérience (entre S1 et S5), cette différence n'est significative que pour les groupes ayant roulés avec un système fiable à 75% et le groupe contrôle. Ensuite, une diminution de la vitesse est observée une fois le système rendu inactif (entre S4 et S5). Cette diminution n'est significative que pour les groupes ayant conduit avec un système fiable à 90%. Enfin, dans le dernier scénario (S5), une différence significative est observée entre la vitesse des groupes ayant au préalable roulé avec les systèmes fiables à 75% et ceux ayant roulé avec le système fiable à 90%. Cette différence révèle une vitesse plus élevée pour les groupes ayant bénéficiés des systèmes fiables à 75%. Une explication possible serait que les participants ayant roulé avec les systèmes fiables à 90% adopteraient une vitesse légèrement moins rapide suite à l'inactivation du système afin de diminuer la prise de risque. Ceux ayant conduit avec un système fiable à 75 % ne diminueraient pas leur vitesse suite à l'inactivation du système. Cela pourrait être dû au fait qu'ils ont le sentiment que le système ne les aidait pas ou peu et par conséquent ils ne ressentiraient pas le besoin d'adopter une stratégie compensant l'arrêt du système. Ces résultats nécessitent d'être approfondis dans de futurs travaux.

Concernant les autres variables observées, nous n'avons pas pu mettre en évidence d'effet de transfert suite à l'usage du système : une fois le système rendu inactif, les effets bénéfiques observés ne perdurent pas dans les conditions de notre expérience.

Toutefois, bien que le groupe contrôle voit ses TR à l'accélérateur et au frein augmenter entre les scénarios 1 et 5, les TR restent stables pour les 4 groupes ayant conduit avec un système. Une possible explication serait que les sujets du groupe contrôle s'habituent plus à la conduite sur simulateur du fait de la similitude de leurs 5 scénarios de conduite. Ils pourraient également expérimenter plus d'ennui.

Concernant le stress ressenti, les 4 groupes ayant conduit avec un système déclarent être moins stressés dans le scénario 5 que le 4. Toutefois ce résultat n'est pas significatif pour le groupe ayant conduit avec un système fiable à 90% et propice aux non-détections.

4. Expérience 2

a. Objectifs et protocole

Cette expérience a porté sur l'impact du moment de déclenchement de l'alerte sur le comportement de conduite des sujets distraits ou non et sur l'adaptation comportementale. Pour cela, 3 groupes de 12 sujets ont été confrontés aux 3 sessions de conduite (Tableau 10).

Lors de la phase d'apprentissage (session 2), nous avons fait varier le moment de déclenchement de l'alerte par rapport à la décélération du véhicule précédent.

Suite aux résultats de la première étude nous avons choisi de nous intéresser à un système signalant 90% des risques de collision et sujet à des fausses alertes.

Tableau 10 : Différenciation des groupes selon la période d'apprentissage (avec et sans système)

	Session 1	Session 2 (apprentissage)			Session 3
Groupes	Scénario 1	Partie 1 Scénario 2	Partie 2 Scénario 3	Partie 3 Scénario 4	Scénario 5
Précoce	Sans système	Alerte précoce	Alerte précoce + distraction	Alerte précoce	Sans système
Intermédiaire		Alerte intermédiaire	Alerte intermédiaire + distraction	Alerte intermédiaire	
Tardif		Alerte tardive	Alerte tardive + distraction	Alerte tardive	

L'alerte est donnée 140, 423 et 763 ms après que la voiture précédente ait commencée à décélérer pour les systèmes précoce, intermédiaire et tardif respectivement.

Suite à l'analyse des résultats, nous nous sommes aperçus d'un biais expérimental. En effet, contrairement à nos attentes, les résultats montrent que l'alerte tardive induit des TTC et des TIV plus longs que l'alerte précoce et l'alerte intermédiaire. Ceci nous a poussés à reprendre nos scénarios de conduite et nous nous sommes aperçus que la décélération du véhicule lièvre était différente pour les 3 groupes de participants. Les participants ayant une alerte tardive avaient aussi un véhicule lièvre qui décélérait plus lentement que les participants ayant une alerte précoce ou intermédiaire. De ce fait, la distance entre les 2 véhicules diminuent moins vite, ce qui explique que les TTC et TIV soient aussi plus grand pour ce système au moment où les participants réagissent.

Ce constat implique que les groupes ne peuvent être comparés entre eux, seules les différences entre scénarios au sein d'un même groupe peuvent-être analysées.

b. Résultats principaux

Effets généraux

L'analyse de variance avec la variable Système (Précoce, intermédiaire, tardif) en intergroupe et la variable Scénarios (S1, S2, S3, S4, S5) en intragroupe révèle un effet du système sur les TR et le TCC ainsi qu'un effet de la variable Scénario sur les TR, le TTC et le TIV (Tableau11).

Tableau 11 : effets principaux sur TR à l'accélérateur, TR au frein, TTC et TIV

	Effet système	Effet scénarios	Interaction
TR accélérateur	F(2,33)=5,39 p=0,009424	F(4,132)=5,18 P=0,000655	-
TR frein	F(2,33)=11,87 p=0,000131	F(4,132)=4,971 P=0,000917	-
TTC	F(2,33)=12,47 p=0,000093	F(4,132)=4,23 P=0,002978	-
TIV	-	F(4,132)=7,07 P=0,000035	-
Vitesse	-	F(4,132)=17,79 P=0,000000	F(8,132)=2,29 P=0,025053

La figure 5 illustre les performances de conduite obtenues pour chacun des 3 groupes au cours des 5 scénarios de conduite consécutifs.

Les tableaux 12 à 17 présentent les résultats statistiques des comparaisons planifiées entre les scénarios de conduite pour les TR à l'accélérateur et au frein, les TTC, les TIV et la vitesse.

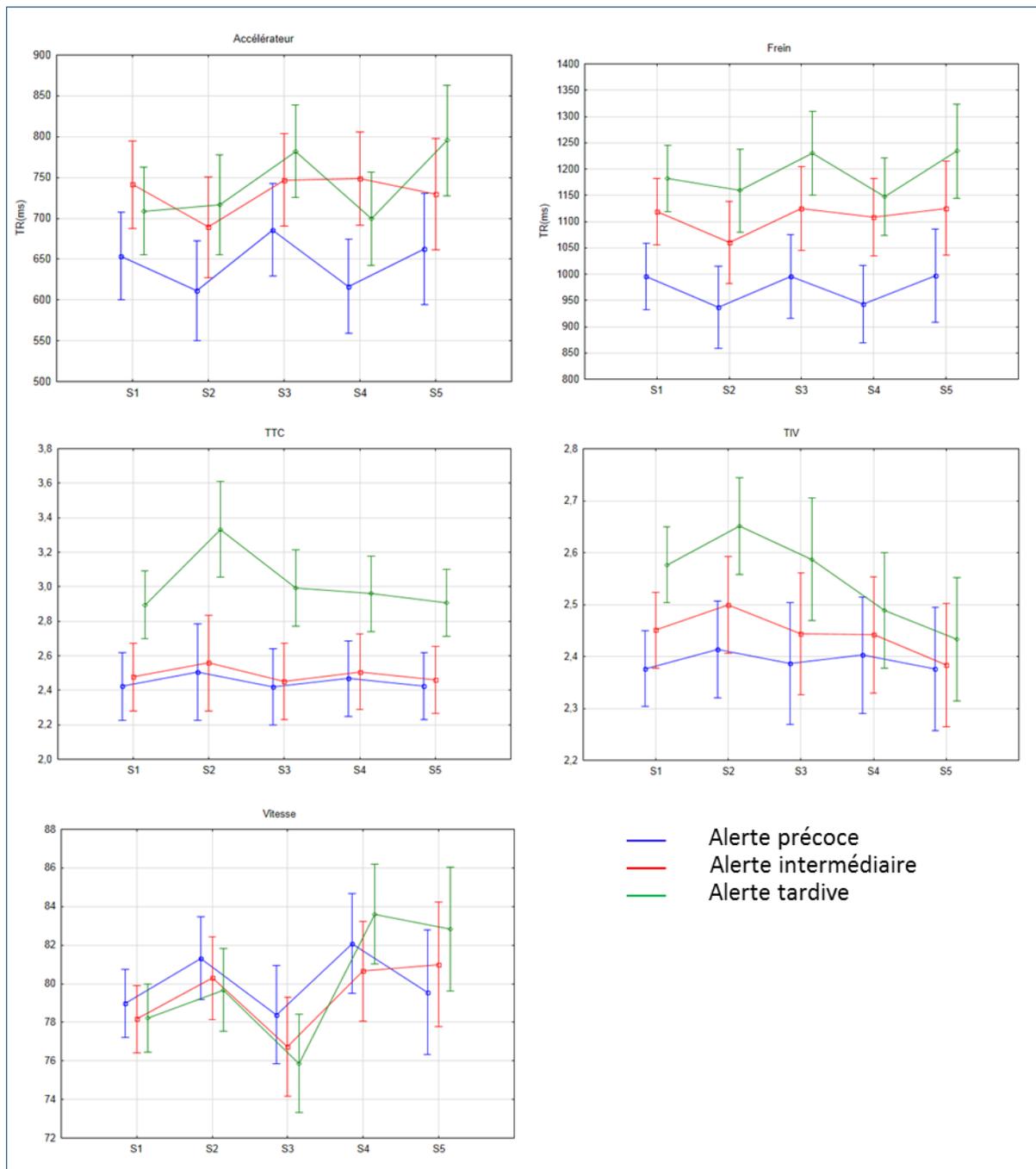


Figure 5 : représentation graphique des performances de conduite (TR accélérateur, TR frein, TIV, TTC, vitesse) au cours des 5 scénarios de conduite (S1 à S5) pour les 3 groupes expérimentaux (Alerte précoce, intermédiaire et tardive).

Introduction du système (S1 vs S2)

Les données révèlent une nette diminution des TR à l'accélérateur pour les alertes précoce et intermédiaire alors que ces TR augmentent pour l'alerte tardive. Toutefois ces différences ne sont pas significatives. Concernant les TR au frein, les données montrent une diminution significative pour les alertes précoce et intermédiaire. Bien que l'alerte tardive induise des

TR plus courts qu'en ligne de base, cette différence n'est pas significative. Concernant les TIV et les TTC, la présence du système permet d'augmenter ces distances de sécurité pour les 3 systèmes. Toutefois, la différence n'est significative que pour le système présentant une alerte tardive (Tableau 12). Le fait que nous n'ayons pas pu mettre en évidence de différence pour les groupes ayant roulé avec les systèmes présentant des alertes précoce et intermédiaire peut s'expliquer par le biais expérimental cité plus haut. En effet, la décélération du lièvre étant plus rapide, les variations de TTC et TIV d'une condition à l'autre sont plus faibles.

Tableau 12 : S1-S2

	Précoce	Intermédiaire	Tardif
TR acc (ms)	657,5 vs 611,3 -	741,7 vs 687,3 -	707,6 vs 711,1 -
TR frein (ms)	999,7 vs 933,6 (p=0,105455)	1120,8 vs 1059,7 (p=0,103729)	1172,6 vs 1158,1 -
TTC (s)	2,43 vs 2,5 -	2,48 vs 2,56 -	2,92 vs 3,34 F=35,13 P=0,00001
TIV (s)	2,37 vs 2,41 -	2,45 vs 2,5 -	2,59 vs 2,64 F=4,10 P=0,051034
Vitesse (km/h)	79 vs 81,4 F=10,59 P=0,002622	78,1 vs 80,3 F=8,79 P=0,005597	78,2 vs 79,7 F=4,10 P=0,051015

Concernant la vitesse, une légère augmentation est observée pour les 3 types de système. Cette augmentation semble plus importante pour les systèmes présentant des alertes précoce et intermédiaire que pour le système présentant une alerte tardive.

Efficacité des systèmes lorsque les participants sont distraits (S2 vs S3 et S1 vs S3)

Les données montrent un effet délétère de la tâche distractive au niveau des TR à l'accélérateur et au frein et ceci pour les trois types de systèmes (précoce, intermédiaire et tardif). Toutefois, seul le système avec alerte tardive induit une diminution significative du TTC lorsque le participant est distrait (Tableau 13).

Lors de l'ajout de la tâche distractive, les participants des 3 groupes diminuent leur vitesse de façon significative.

Tableau 13 : S2-S3

	Précoce	Intermédiaire	Tardif
TR acc (ms)	611,3 vs 688,8 F=6,55 P=0,015252	687,3 vs 755,4 F= 3,98 p=0.054497	711,1 vs 778,8 F=5,07 P=0.031084
TR frein (ms)	933,6 vs 998,6 - (0.08)	1059,7 vs 1131,5 F=3,97 P=0,05416	1158,1 vs 1219,9 F=4,81 P=0,035502
TTC (s)	2,5 vs 2,4 -	2,56 vs 2,46 -	3,34 vs 2,97 F=14,16 P=0,000655
TIV (s)	2,41 vs 2,38 -	2,5 vs 2,44 -	2,64 vs 2,58 -
Vitesse (km/h)	81,4 vs 78,4 F=7,43 P=0,010166	80,3 vs 76,7 F=10,95 P=0,002269	79,7 vs 75,9 F=12,54 P=0,001209

Tableau 14 : S1-S3

	Précoce	Intermédiaire	Tardif
TR acc (ms)	657,5 vs 688,8 -	741,7 vs 755,4 -	707,6 vs 778,8 F=7,9 P=0,008259
TR frein (ms)	999,7 vs 998,6 -	1120,8 vs 1131,5 -	1172,6 vs 1219,9 -
TTC (s)	2,43 vs 2,4 -	2,48 vs 2,46 -	2,92 vs 2,97 -
TIV (s)	2,37 vs 2,38 -	2,45 vs 2,44 -	2,59 vs 2,58 -
Vitesse (km/h)	79 vs 78,4 -	78,1 vs 76,7 -	78,2 vs 75,9 F=4,01 P=0,053450

Comparativement à la situation sans système et sans distraction (Tableau 14), les TR à l'accélérateur sont plus élevés pour le groupe avec alerte tardive lorsque les participants sont distraits.

Par ailleurs, une diminution de la vitesse par rapport à la ligne de base (S1) est observée pour les 3 groupes lors du scénario avec la tâche distractive, toutefois elle n'est significative que pour le système avec alerte tardive.

Système inactif et effet de transfert (S4 vs S5 et S1 vs S5)

Lorsque le système devient inactif (S5) (Tableau 15), les données montrent une augmentation des TR pour les 3 systèmes. Cette augmentation est significative pour le TR à l'accélérateur pour le système avec alerte tardive uniquement et pour les TR au frein pour les systèmes avec alertes précoce et tardive.

De plus, lors de la mise hors service du système, seul le groupe ayant roulé avec le système avec alerte précoce diminue sa vitesse de façon significative.

Tableau 15 : S4-S5

	Précoce	Intermédiaire	Tardif
TR acc (ms)	618,7 vs 662,6 -	746,7 vs 728,9 -	703,1 vs 795,7 F=11,59 P=0,001755
TR frein (ms)	944,2 vs 995,2 F=3,89 P=0.056989	1105,2 vs 1120,3 -	1145,6 vs 1232,2 F=10,17 P=0,003122
TTC (s)	2,46 vs 2,43 -	2,49 vs 2,47 -	2,99 vs 2,91 -
TIV (s)	2,4 vs 2,37 -	2,44 vs 2,39 -	2,49 vs 2,43 -
Vitesse (km/h)	82 vs 79,6 F=5,60 P=0,024042	80,6 vs 81 -	83,6 vs 82,9 -

Nous n'avons pas observé d'effet de transfert entre S1 et S5 suite à l'utilisation des systèmes avec alerte précoce et intermédiaire. Il semble donc que l'utilisation de ces systèmes permette de maintenir des TR à l'accélérateur et au frein similaire au niveau de base (S1). Par contre, une augmentation significative des TR à l'accélérateur est observée pour le groupe ayant conduit avec le système présentant une alerte tardive accompagnée par une diminution des TIV et d'une augmentation de la vitesse (Tableau 16).

Tableau 16 : S1-S5

	Précoce	Intermédiaire	Tardif
TR acc (ms)	657,5 vs 662,6 -	741,7 vs 728,9 -	707,6 vs 795,7 F=8,82 P=0,005509
TR frein (ms)	999,7 vs 995,2 -	112,8 vs 1120,3 -	1172,6 vs 1232,2 -
TTC (s)	2,43 vs 2,43 -	2,48 vs 2,47 -	2,92 vs 2,91 -
TIV (s)	2,37 vs 2,37 -	2,45 vs 2,39 -	2,59 vs 2,43 F=8,04 P=0,007743
Vitesse (km/h)	79 vs 79,6 -	78,1 vs 79,4 - (0,067)	78,2 vs 80,1 F=9,66 P=0,003868

Données physiologiques

Comme dans l'expérience 1, une diminution progressive du rythme cardiaque est observée pour l'ensemble des participants au cours de l'expérience excepté entre S2 et S3, c'est-à-dire lors de l'ajout de la tâche distractive (Tableau 17).

Tableau 17 : Rythme cardiaque moyen (battements par minute) selon le groupe et le scénario

	S1	S2	S3	S4	S5
précoce	85	72,5	74,7	70,3	69,1
intermédiaire	77,6	75,1	76,6	72,6	72,7
tardif	74,5	72,1	73,4	70	69,5

L'augmentation du rythme cardiaque lors de l'ajout de la tâche distractive est significative uniquement pour le système précoce (Tableau 18).

Tableau 18 : Données statistiques correspondant aux comparaisons du rythme cardiaque entre les scénarios et selon le groupe

	S1-S2	S2-S3	S3-S4	S4-S5	S1-S5
précoce	F=8,33 P=0,0081332	F=4,62 P=0,041892	F=15,12 P=0,000697	- (0,09)	F=13,45 P=0,001217
intermédiaire	F=8,06 P=0,009047	-	F=11,57 P=0,002353	-	F=8,52 P=0,007520
tardif	F=7,97 P=0,009395	-	-	-	F=7,96 P=0,009454

Jugement d'utilité et de satisfaction

Comme dans l'étude 1, les scores de satisfaction et d'utilité sont très bas (Figure 5). Malgré cela, les participants ont encore une fois jugé que les systèmes étaient utiles, le système avec alerte précoce étant perçu comme le plus utile aux yeux de nos participants.

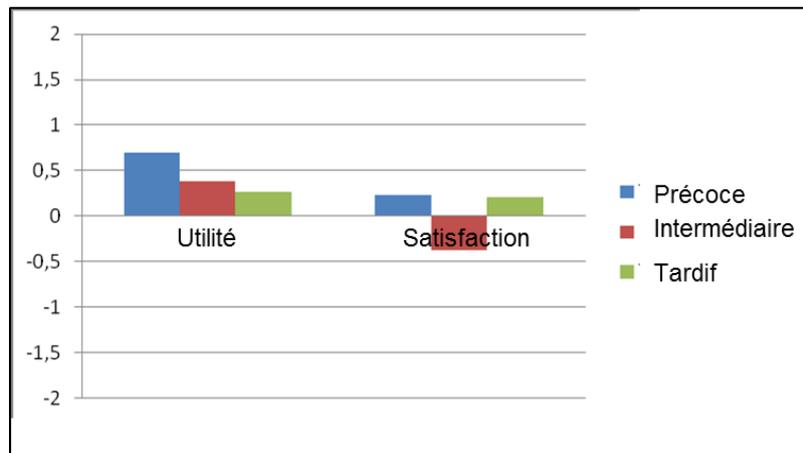


Figure 5 : scores d'utilité et de satisfaction selon le système utilisé.

De façon surprenante, c'est le système avec alerte intermédiaire qui reçoit la moins bonne note concernant la satisfaction des usagers. Toutefois, nous n'avons pas observé de différences significatives entre les groupes.

Résultats obtenus pour le stress ressenti

Nous avons utilisé le même principe de calcul que dans l'expérience 1, en prenant en compte les variations du score obtenu en fin de chaque scénario en fonction du score de base (score obtenu après la séance d'entraînement) (Figure 6).

Les données ont été analysées selon une ANOVA avec Système (tardif, intermédiaire et précoce) en intergroupe et la Variation (Var0, Var1, Var2, Var3, Var4) en intragroupe.

Les analyses ont révélé un effet simple de la Variation ($F(4, 132) = 5.78, p < .001$).

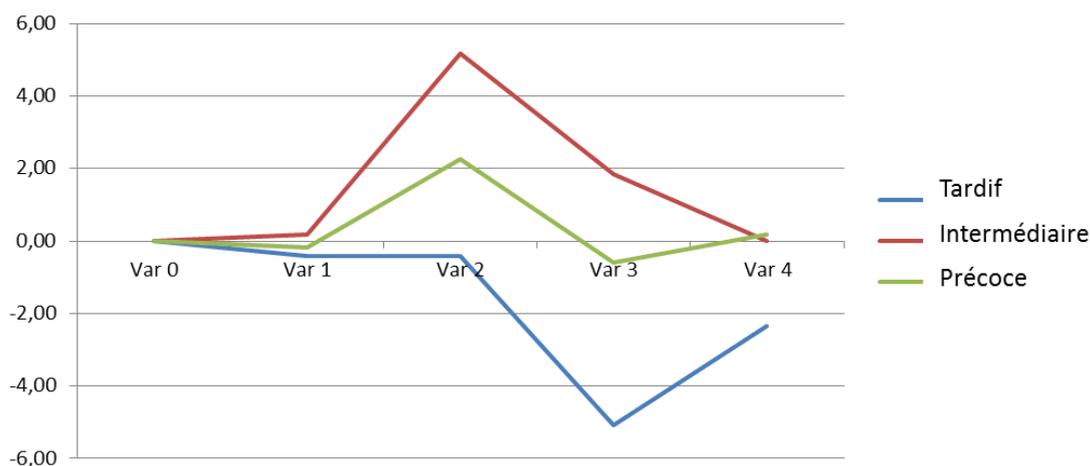


Figure 6 : Variation du score de stress ressenti en fonction du scénario et du groupe d'appartenance

Nous avons analysé les résultats au cours des variations. De la **Variation 0 à la Variation 1**, aucune différence n'a été observée. De la **Variation 1 à la Variation 2**, seul le groupe intermédiaire diffère ($F(1, 33) = 7.39, p < .05$). De la **Variation 2 à la Variation 3**, seul le groupe tardif diffère ($F(1, 33) = 3.91, p < .05$). De même, de la **Variation 3 à la Variation 4**, seul le groupe tardif diffère ($F(1, 33) = 5.17, p < .05$).

Les comparaisons intergroupes ont montré une différence significative au niveau de la **variation 3** : le groupe tardif diffère des 2 autres groupes ($F(1, 33) = 4.23, p < .05$). Il en est de même pour la **variation 4** ($F(1, 33) = 4.09, p < .05$).

c. Conclusion préliminaire

L'objectif de cette étude était d'estimer l'impact du moment de déclenchement de l'alerte sur l'efficacité et l'acceptabilité d'un système signalant les risques de collision.

Introduction du système (S2)

L'introduction des systèmes a induit une réduction des TR à l'accélérateur et au frein pour les systèmes avec alertes précoce et intermédiaire. Toutefois, ces réductions ne sont significatives que pour les TR au frein. Une augmentation des TTC et TIV est également observée mais elle n'est significative que pour le système avec alerte tardive. Comme dans

l'expérience 1, une augmentation de la vitesse est observée lors de l'introduction du système.

Contrairement à nos attentes, nous n'avons pas complètement répliqué les résultats de l'étude 1 concernant l'effet bénéfique du système signalant 90% des risques de collision et propice aux fausses alertes. Après une vérification de nos scénarios, nous avons pu noter une différence dans la force de décélération du véhicule lièvre qui peut expliquer ces différences.

Impact de la tâche distractive (S3)

Un effet délétère de la tâche distractive a pu être mis en évidence avec un allongement des temps de réaction à l'accélérateur et au frein pour les 3 systèmes.

Seul le système avec alerte tardive conduit à des TR à l'accélérateur plus longs dans la situation de distraction (S3) que dans la situation de base (S1), les systèmes avec alertes précoce et intermédiaire permettant de maintenir des TR similaires à ceux obtenus sans distraction et sans système. Si une diminution de la vitesse est observée pour les 3 systèmes lors de l'ajout de la tâche distractive, seul le groupe conduisant avec le système présentant une alerte tardive adopte une vitesse plus lente dans la situation de distraction (S3) que dans la situation de base (S1). Cette diminution de la vitesse traduirait une stratégie adaptative lors d'une surcharge cognitive. Il semble donc que les participants adoptent cette stratégie quel que soit le système utilisé mais avec plus d'impact lorsque le système émet une alerte tardive. Dans ce dernier cas, il est à noter que le moment de déclenchement de l'alerte tombe dans la fenêtre temporelle des TR à l'accélérateur. Il est alors fréquent que les participants aient initié leur réponse avant ou au même moment que le déclenchement de l'alerte. C'est pourquoi, ils ne peuvent pas se reposer sur le système pour les avertir du danger.

Il est intéressant de noter que le biais expérimental observé plus haut implique que la situation est moins urgente pour le groupe tardif que pour les 2 autres groupes. En effet, la voiture lièvre décélère moins fort et par conséquent, les distances de sécurité diminuent moins vite. Malgré cela, le système bénéficiant d'une alerte tardive ne semble pas en mesure de compenser les effets de la distraction.

Concernant le stress ressenti, seuls les usagers conduisant avec un système présentant une alerte tardive ne rapportent pas un stress plus élevé lors de la double tâche. Ce résultat peut également être induit par la situation expérimentale rendant la situation moins urgente dans

le cas de l'alerte tardive. Quoi qu'il en soit, le stress déclaré est plus important pour les groupes ayant bénéficié des alerte précoce ou intermédiaire, ceux-là même qui obtiennent des performances de conduite plus sécuritaires. Par ailleurs il est accompagné d'une augmentation du rythme cardiaque pour le groupe ayant bénéficié d'une alerte précoce. Comme dans l'expérience 1, il est probable que ce niveau de stress soit bénéfique pour la tâche de conduite.

Mise à l'arrêt du système (S5)

La mise à l'arrêt du système se traduit par une augmentation des TR à l'accélérateur et au frein pour le groupe tardif et une augmentation des TR au frein pour le groupe précoce. Nous n'avons pas pu mettre en évidence d'augmentation des TR à l'accélérateur et au frein pour le groupe intermédiaire. Seuls les usagers ayant conduit avec le système présentant une alerte précoce présentent une diminution significative de la vitesse lors de l'arrêt du système. Cette diminution peut être interprétée comme une stratégie compensatrice, les participants ne pouvant plus se reposer sur le système.

Enfin, par rapport à la situation initiale (S1) l'usage du système présentant une alerte tardive conduit à un allongement des TR à l'accélérateur, un raccourcissement des TIV ainsi qu'une augmentation de la vitesse une fois le système inactif (S5).

5. Conclusions

Les données obtenues dans le cadre du projet ACT et concernant l'efficacité et l'acceptabilité des systèmes d'alerte anti-collision montrent que dans les conditions de nos expérimentations :

- Les alertes signalant 75 % et 90 % des risques de collision permettent de diminuer les temps de réaction à l'accélérateur et au frein et d'augmenter les TIV et TTC au moment où le participant freine (expérience 1),
- Lors d'une tâche distractive, les alertes signalant 75% et 90 % des risques de collision permettent d'obtenir des temps de réaction inférieurs à ceux observés dans la ligne de base (sans distraction et sans système)

- Toujours lors d'une tâche distractive, les alertes signalant 90% des risques de collision permettent également d'augmenter la distance inter-véhiculaire et le temps à la collision (au moment de la réaction du participant) et ceci quel que soit le type d'erreurs du système (expérience 1),
- Suite à l'arrêt du système, les participants ayant roulé avec les systèmes fiables à 90% adopteraient une vitesse légèrement moins rapide, ce qui pourrait refléter une stratégie de compensation afin de diminuer la prise de risque.
- Le stress ressenti hors présence d'une double tâche, ne semble pas impacter par le type de système ou le type d'erreurs du système (expérience 1),
- Bien que les systèmes propices aux fausses alertes puissent être perçus comme irritant, les systèmes propices aux non-détections étaient perçus comme moins satisfaisant par nos participants (expérience 1),
- L'introduction des systèmes ne modifie pas le stress ressenti (expériences 1 et 2)
- Bien que des données complémentaires doivent être apportées pour pallier au biais expérimental noté, le système fiable à 90% ayant un seuil de déclenchement de l'alerte tardif n'est pas efficace pour compenser les effets de la distraction d'ordre cognitif que nous avons employé ici, sur les temps de réaction (expérience 2),
- Ce résultat se traduit également au niveau de la vitesse : les participants bénéficiant d'un système avec alerte tardive adoptent une stratégie compensatrice (consciente ou non) lors de la situation avec distraction avec une vitesse plus lente que dans la situation sans distraction et sans système (expérience 2)
- Lors de l'arrêt du système, les usagers ayant bénéficié d'une alerte tardive signalant 90% des risques de collision ont tendance à augmenter leur vitesse (expérience 2) .

Avec le déploiement des assistances à la conduite, nombre de questions méritent d'être abordées afin d'optimiser les systèmes en termes de sécurité et de confort et ainsi de garantir la sécurité de tous les usagers. Les travaux menés ainsi que la revue de la littérature effectuée ici soulèvent plusieurs points.

Bien qu'intuitivement, les tâches visuelles et visuo-motrices paraissent les plus risquées derrière un volant, les tâches purement cognitives impliquant de détourner l'attention de la route peuvent avoir un fort pouvoir distractif et être un facteur de risque important dans des situations critiques. Or de notre point de vue ces situations sont encore trop peu étudiées à ce jour. En effet, si les conducteurs sont conscients du risque pris lorsqu'ils détournent les yeux de la route (et peuvent ainsi plus facilement adopter sciemment des stratégies

compensatrices), les réflexions personnelles ou le vagabondage de pensées ne sont a priori pas perçus comme problématiques. Pourtant les données de la littérature montrent qu'un certain nombre d'accidents peuvent être au moins en partie attribuable à ces facteurs. Ainsi Galéra et al. (2012) ont observé que 50% des conducteurs impliqués dans un accident corporel déclaraient des périodes de vagabondage de la pensée avant l'accident. Parmi eux, ceux déclarant que ces pensées étaient fortement distractives avaient plus de chance d'être responsables de l'accident (Odd-ratio : 2,12). Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans la partie introductive de ce document, l'efficacité des alertes a été majoritairement démontrée lors de tâches distractives visuelles ou visuo-motrices. Or les quelques expériences ayant utilisées des tâches distractives d'ordre purement cognitif ont obtenus des résultats plus mitigés. Ils semblent donc que la prise en compte des modalités sensorielles impliquées dans les tâches rentrant en compétition avec la conduite est primordiale pour évaluer l'ensemble des effets positifs et négatifs des systèmes d'alerte.

On notera également que ces tâches cognitives et donc leur implication sur les performances de conduite peuvent fortement varier selon le niveau de ressources attentionnelles qu'elles engagent mais aussi selon les capacités cognitives des usagers.

Par ailleurs, nous avons vu que certains systèmes reposent sur une approche cinématique pour déterminer la distance minimale nécessaire pour arrêter le véhicule en toute sécurité. Les algorithmes utilisés peuvent incorporer une estimation de deux paramètres spécifiques au conducteur qui peuvent influencer considérablement sur l'efficacité du signal : le temps de réaction et la force de décélération (McLaughlin et al., 2009). Il semble donc important d'estimer ces paramètres en fonction des usagers et dans des conditions qui peuvent fortement altérer leurs performances comme l'inattention.

Les résultats observés ici permettent d'ores et déjà de répondre à certaines questions en lien avec les facteurs influençant l'efficacité et l'acceptabilité des systèmes d'alerte anti-collision. Toutefois avant de pouvoir généraliser ces résultats, d'autres études sont nécessaires. En effet, si le simulateur permet d'expérimenter dans des conditions contrôlées et reproductibles d'un participant à l'autre, il n'en demeure pas moins que les conditions d'expérimentations ne sont pas naturelles. De plus, les conditions expérimentales nous ont amenés à répéter un grand nombre de fois les situations où l'alerte sonore était émise. Ce taux d'alerte est bien supérieur à ce qui se passe généralement sur la route. Par conséquent des études sur route ou tout du moins sur piste dans des conditions d'utilisation plus réalistes permettraient d'enrichir ces travaux. Par ailleurs, nous nous sommes ici intéressés à une des fonctions des systèmes anti-collision à savoir l'alerte sonore généralement émise lorsque la distance de sécurité avec le véhicule de devant est trop courte et que le conducteur tarde à réagir alors qu'une action urgente doit être envisagée. D'autres études plus intégratives devraient être

menées pour prendre en compte l'ensemble des fonctions (par ex. avertissement au moyen d'une information visuelle, alerte sonore signifiant l'urgence d'agir, freinage autonome si l'utilisateur ne réagit toujours pas) des systèmes anti-collision actuellement sur le marché.

Comme nous l'avons vu, le moment de déclenchement de l'alerte est un facteur sensible qui impacte l'efficacité des systèmes. Or une étude de 2009 ayant testé trois systèmes différents (sur le marché) dans des conditions identiques sur piste avait montré que les prédictions du temps à la collision pouvaient varier jusqu'à 800 ms entre un modèle et un autre (Forkenbrock & O'Harra, 2009). Ces données ainsi que les résultats obtenus dans la deuxième expérience de ce projet poussent à approfondir les recherches sur ce point. Il est probable que l'efficacité du système dépende à la fois du moment de déclenchement et de la force de décélération du véhicule précédent.

Nous avons abordé ici la question de l'adaptation comportementale à moyen terme, après 45 minutes de conduite. Toutefois, la question de l'adaptation comportementale à long terme après plusieurs mois ou années d'utilisation d'un système nous apparaît comme fondamentale. Y a-t-il des risques de perte de compétences avec une perte d'habitude de contrôler les distances de sécurité par exemple, ou bien au contraire, l'usage de système d'alerte peut-il agir comme un système d'apprentissage à l'instar des résultats obtenus par Ben Yaacov et al. (2002). Les usagers peuvent-ils adopter des styles de conduite moins sécuritaire (vitesse plus élevée, pratique plus régulière de tâches secondaires) en se reposant trop fortement sur le système.

Enfin, un point non abordé ici mais qui mérite d'être pris en compte concerne la connaissance que peuvent avoir les usagers sur les systèmes et leurs limites. En effet ce facteur est particulièrement important dans l'acceptabilité du produit. Cette notion devra être prise en compte dans des travaux futurs.

Bien que ces recherches nécessitent d'être approfondies, plusieurs recommandations peuvent être faites sur la base de la revue de la littérature et des résultats obtenus. Tout d'abord, il semble nécessaire lors de l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'utiliser plusieurs tâches distractives impliquant différentes modalités et différentes charges cognitives. De plus, cette évaluation de l'efficacité des systèmes devraient être faite sur un large public afin de s'assurer que le plus grand nombre bénéficie du système et qu'aucun ne soit négativement impacté par son usage. Comme attendu, une fiabilité quasi-parfaite pour des systèmes d'information tels celui testé dans notre étude (alerte anti-collision) ne prenant pas le contrôle du véhicule, garanti une meilleure acceptation du système. Par ailleurs, le moment de déclenchement de l'alerte ainsi que la force de décélération du véhicule de

devant semble des facteurs importants à prendre en compte lors de l'évaluation de ces systèmes. Enfin, il semble que les systèmes propices aux fausses alertes soient plus facilement acceptables et qu'ils induisent des comportements plus sécuritaires notamment en termes de distances inter-véhiculaires et de vitesse.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Abe, G., Itoh, M., & Tanaka, K. (2002). Dynamics of drivers' trust in warning systems. Paper presented at the 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain.
- Abe, G., Itoh, M., & Yamamura, T. (2011). Visual distraction when driving and its influence on driver response to a forward collision warning system. Paper presented at the SICE Annual Conference, Tokyo, Japan.
- Abe, G., & Richardson, J. (2004). The effect of alarm timing on driver behaviour: an investigation of differences in driver trust and response to alarms according to alarm timing. *Transportation Research Part F*, 7, 307–322.
- Abe, G., & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics*, 37, 577–586.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*, Paris: PUF.
- Bayly, M., Fildes, B., Regan, M., & Young, K. (2007). Review of crash effectiveness of Intelligent Transport Systems. *Project No. 027763 – TRACE*.
- Bella, F., & Russo, R. (2011). A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 676-686.
- Ben-Yaacov, A., Maltz, M., & Shinar, D. (2002). Effects of an In-Vehicle Collision Avoidance Warning System on Short- and Long-Term Driving Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(2), 335-342.
- Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. *Applied Ergonomics*, 34(6), 499-509.
- Breuer, J. J., Faulhaber, A., Frank, P., & Gleissner, S. (2007). *Real world safety benefits of brake assistance systems*. Paper presented at the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Lyon.
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Deleurence, P., Ndiaye, D., & Fort, A. (2012). Analysis of a surrogate forward collision warning system from an electroencephalographic perspective. *Brain Research*, 1470: 69-79.
- Bueno M., Fort, A., Francois M., Ndiaye D., Deleurence P. & Fabrigoule C. (2013) Effectiveness of a Forward Collision Warning System in simple and in dual task from an electrophysiological perspective. *Neuroscience Letters*, 541: 219-223.
- Bueno, M., Fabrigoule, C., Ndiaye, D. & Fort, A. (2014) Behavioural adaptation and effectiveness of a Forward Collision Warning System according to a secondary cognitive task. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 24:158-168.

- Cahour, B., & Forzy, J.-F. (2009). Does projection into use improve trust and exploration? An example with a cruise control system. *Safety Science*, 47, 1260-1270.
- Campbell, J. L., Richard, C. M., Brown, J. L., & McCallum, M. (2007). *Crash Warning System Interfaces: Human Factors Insights and Lessons Learned*. Final Report Seattle: Battelle Center for Human Performance and Safety.
- Chun, J., Han, S. H., Park, G., Seo, J., Lee, I., & Choi, S. (2012). Evaluation of vibrotactile feedback for forward collision warning on the steering wheel and seatbelt. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 443-448.
- Cummings, M. L., Kilgore, R. M., Wang, E., Tijerina, L., & Kochhar, D. S. (2007). Effects of Single Versus Multiple Warnings on Driver Performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(6), 1097-1106.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J., and Knippling, R. R. (2006). *The 100-Car Naturalistic Driving Study, Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment* Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration.
- Drews, F. A., Yazdani, H., Godfrey, C. N., Cooper, J. M., & Strayer, D. L. (2009). Text Messaging During Simulated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(5), 762-770.
- Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 97-120.
- Enriquez, M. J., & MacLean, K. E. (2004) Impact of haptic warning signal reliability in a time-and-safety-critical task. *Proceedings of the 12th Annual Symposium on haptic interfaces for virtual environments and teleoperator systems*, IEEE-VR2004, USA, 407-415.
- European Statement of Principles on Human Machine Interface for In-Vehicle Information and Communication Systems (1998).
- European Commission. (2010). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*.
- European Commission. (2013). *EU road fatalities* Retrieved 29 April, 2013, from http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/observatory/trends_figures.pdf
- Fort, A., Collette, B., Bueno, M., Deleurence, P., Bonnard, A., & Fabrigoule, C. (2013). Impact of totally and partially predictive alert in distracted and undistracted subjects: an event related potential study. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 50: 578-586.
- Galéra, C., Orriols, L., M'bailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribéreau-Gayon, R., Masson, F., Bakiri, S., Gabaude, C., Fort, A., Maury, B., Lemerrier, C., Cours, M., Bouvard, M.P., Lagarde, E. (2012) Mind wandering and driving: responsibility case-control study. *British medical Journal*, 345:e8105

- Georgi, A., Zimmermann, M., Lich, T., Blank, L., Kickler, N., & Marchthaler, R. (2009). New approach of accident benefit analysis for rear end collision avoidance and mitigation systems. Paper presented at the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Stuttgart, Germany.
- Grover, C., Knight, I., Okoro, F., Simmons, I., Couper, G., Massie, P., & Smith, B. (2008). Automated Emergency Brake Systems: Technical requirements, costs and benefits: TRL Limited.
- Harbluk, J. L., Noy, Y. I., & Eizenman, M. (2002). The Impact of Cognitive Distraction on Driver Visual Behaviour and Vehicle Control (No. TP 13889E): Transport Canada.
- Harder, K. A., Bloomfield, J., & Chihak, B. J. (2003). The Effectiveness of Auditory Side- and Forward-Collision Warnings in Winter Driving Conditions. Minnesota: University of Minnesota.
- Highway Loss Data Institute. (2012a). Acura collision avoidance features: initial results. Bulletin 28(21), 1-8.
- Highway Loss Data Institute. (2012b). Mercedes-Benz collision avoidance features: initial results. Bulletin 29(7), 1-22.
- Highway Loss Data Institute. (2012c). Volvo collision avoidance features: initial results. Bulletin, 29(5), 1-11.
- Ho, C., & Spence, C. (2009). Using peripersonal warning signals to orient a driver's gaze. 51(4), 539-556.
- Houser, A., Pierowicz, J., & McClellan, R. (2005). Concept of Operations and Voluntary Operational Requirements for Forward Collision Warning Systems (CWS) and Adaptive Cruise Control (ACC) Systems On-Board Commercial Motor Vehicles (No. FMCSA-MCRR-05-007). Washington, DC: Federal Motor Carrier Safety Administration.
- Jamson, A. H., Lai, F. C. H., & Carsten, O. M. J. (2008). Potential benefits of an adaptive forward collision warning system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(4), 471-484.
- Jamson, A. H., & Merat, N. (2005). Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(2), 79-96.
- Kaber, D. B., Liang, Y., Zhang, Y., Rogers, M. L., & Gangakhedkar, S. (2012). Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(5), 491-501.
- Kidd, D. G., Nelson, E. T., & Baldwin, C. L. (2010). The Effects of Repeated Exposures to Collision Warnings on Drivers' Willingness to Engage in a Distracting Secondary Task. Paper presented at the *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*.
- Kiefer, R. J., Cassar, M. T., Flannagan, C. A., Jerome, C. J., & Palmer, M. D. (2005). Surprise Braking Trials, Time-to-Collision Judgments, and "First Look" Maneuvers Under Realistic Rear-End Crash

- Scenarios. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, Final Report DOT HS 809 902.
- Kiefer, R., LeBlanc, D., Palmer, M., Salinger, J., Deering, R., & Shulman, M. (1999). Development and validation of functional definitions and evaluation procedures for collision warning/avoidance systems. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Knipling, R. 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.
- Kramer, A. F., Cassavaugh, N., Horrey, W. J., Becic, E., & Mayhugh, J. L. (2007). Influence of Age and Proximity Warning Devices on Collision Avoidance in Simulated Driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 935-949.
- Lazarus, R.S., & Folkman, S. (1984). Stress, appraisal, and coping. New York: Springer Publishing Company, Inc.
- 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(2), 314-334.
- Lees, M. N., & Lee, J. D. (2007). The influence of distraction and driving context on driver response to imperfect collision warning systems. *Ergonomics*, 50(8), 1264-1286.
- Lerner, N. D., Dekker, D. K., Steinberg, G. V., & Huey, R. W. (1996). Inappropriate Alarm Rates and Driver Annoyance. *Washington, DC National Highway Traffic Safety Administration*.
- Maltz, M., & Shinar, D. (2004). Imperfect in-vehicle collision avoidance warning systems can aid drivers. *Human Factors*, 46(2), 357-366.
- Matthews, G., Zeidner, M., & Roberts, R.D. (2003). Emotional intelligence: Science and myth. Cambridge, MA: MIT Press.
- McKeever, B. B. (1998). Working Paper: Estimating the Potential Safety Benefits of Intelligent Transportation Systems. Washington: Mitretek Systems.
- McLaughlin, S. B., Hankey, J. M., Dingus, T. A., & Klauer, S. G. (2009). Development of an FCW Algorithm Evaluation Methodology With Evaluation of Three Alert Algorithms. Virginia: Virginia Tech Transportation Institute.
- Melillo P, Bracale M, Pecchia L. (2011) Nonlinear Heart Rate Variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination. *Biomed Eng Online*. Nov 7;10(1):96.
- Mohebbi, R., Gray, R., & Tan, H. Z. (2009). Driver Reaction Time to Tactile and Auditory Rear-End Collision Warnings While Talking on a Cell Phone. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 51(1), 102-110.

- Muhrer, E., & Vollrath, M. (2010). Expectations while car following--the consequences for driving behaviour in a simulated driving task. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 2158-2164.
- Murher, E., Reinprecht, K., & Vollrath, M. (2012). Driving With a Partially Autonomous Forward Collision Warning System: How Do Drivers React? *Human Factors*, 54(5), 698-708.
- Najm, W. G., Smith, J. D., & Yanagisawa, M. (2007). Pre-crash scenario typology for crash avoidance research. (Tech. Rep. DOT-HS-810 767), United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.
- Najm, W. G., Stearns, M. D., Howarth, H., Koopmann, J., & Hitz, J. (2006). Evaluation of an automotive rear end collision avoidance system. Cambridge: U.S. Department of Transportation.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J.F., El-Jaafari, M., & Hoc, J.M. (2010). Car driving lateral control assistance: motor priming and warning systems objective and subjective evaluation. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 3, 904-912.
- OECD (1990). Behavioural adaptations to changes in the road transport system. Paris: OECD expert group.
- OECD. (2003). Road Safety: Impact of new technologies: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- ONISR (2012). Statistiques d'accidentalité routière : résultats définitifs de l'année 2011.
- Parasuraman, R., Hancock, P. A., & Olofinboba, O. (1997). Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. *Ergonomics*, 40(3), 390-399.
- Reason, J., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J., & Campbell, K. (1990). Errors and violations on the roads: A real distinction? *Ergonomics*, 33, 1315-1332.
- Rudin-Brown, C. M., & Noy, Y. I. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record*, 1803, 30-37.
- Rudin-Brown, C. M., & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F* 7 59-76.
- Saad, F., Hjalmdahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., Nathan, F., Ojeda, L., Papakostopoulos, V., Panou, M., & Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects AIDE Project, Deliverable D1.2.1. Brussels: Information Society Technologies.
- SAE J2400. (2003). Human Factors in Forward Collision Warning Systems: Operating Characteristics and User Interface Requirements: SAE International Surface Vehicle Information Report.
- Salahuddin L., Jeong M., Kim D., Lim S., Kim W., & Woo J. (2007) Dependence of Heart Rate Variability on Stress Factors of Stress Response Inventory, *IEEE Healthcom*, Taipei, Taiwan, Jun. 2007.

- Sander, D. & Scherer, K. R. (2009). *Traité de psychologie des émotions*. Paris: Dunod. Spielberger, C.D. (1993). *Inventaire d'anxiété état-trait, Forme Y (S.T.A.I.-Y)* : Traduction et validation française par M. Bruchon-Schweitzer et I. Paulhan. Paris : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Schoitsch, E. (2008). *Analysis and assessment of potential scenarios*. Deliverable D1.1, ADOSE Project: Reliable application specific detection of road users with vehicle on-board sensors.
- Seiler, P., Song, B., & Hedrick, J. K. (1998). *Development of a Collision Avoidance System*. Paper presented at the Society of Automotive Engineers, Inc.
- Stutts, J., Feaganes, J., Reinfurt, D., Rodgman, E., Hamlett, C., Gish, K., et al. (2005). *Driver's exposure to distractions in their natural driving environment*. *Accid Anal Prev*, 37(6), 1093-1101.
- Stutts, J., Reinfurt, D. W., Staplin, L., & Rodgman, E. A. (2001). *The role of driver distraction in traffic crashes*: AAA Foundation for Traffic Safety.
- Tijernia, L., Jackson, J. L., Pomerleau, D. A, Romano, R. A, & Petersen, A. D. (1996). *Driving simulator tests of lane departure collision avoidance systems*. In *proceedings of ITS America sixth annual meeting*, Houston.
- Van der Laan, J.D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). *A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics*. *Transportation Research - Part C: Emerging Technologies*, 5, 1-10.
- Vogel, L., & Bester, C. J. (2005). *A relationship between accident types and causes*. Paper presented at the 24th Southern African Transport Conference, South Africa.
- Wickens, C. D. (1980). *The structure of attentional resources*. In R. Nickerson (Ed.), *Attention and performance* (pp. 239-257). Hillsdale: NJ Erlbaum.
- Wickens, C. D., & Dixon, S. R. (2007). *The benefits of imperfect diagnostic automation: a synthesis of the literature*. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(3), 201-212.
- Winsum Van, W., & Godthelp, H. (1996). *Speed choice and steering behavior in curve driving*. *Human Factors*, 38, 434-441.
- World Health Organization. (2004). *World report on road traffic injury prevention*. In M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, D. S. Hyder, E. Jarawan & C. Mathers (Eds.). Geneva: World Health Organization.
- Zhu, B. (2001). *Potential Effects on Accidents from Forward Collision Warning/Avoidance System*. Master Thesis, Linköping University, Sweden.