



HAL
open science

Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire

Jordan Navarro

► **To cite this version:**

Jordan Navarro. Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire. Psychologie. Université de Nantes, 2008. Français. NNT : . tel-00365077

HAL Id: tel-00365077

<https://theses.hal.science/tel-00365077>

Submitted on 2 Mar 2009

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.

Université de Nantes

U.F.R. de Psychologie

THESE DE DOCTORAT

Psychologie cognitive

Année :

N° attribué par la bibliothèque :

Présentée et soutenue publiquement par :

Navarro Jordan

le 17 septembre 2008

Pour l'obtention du titre de docteur de l'Université de Nantes

Coopération homme-machine en conduite automobile assistée :

Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire

Jury :

Daniel MESTRE	Directeur de recherche, CNRS, Marseille	<i>Rapporteur</i>
Franck MARS	Chargé de recherche, CNRS, Nantes	<i>Co-encadrant</i>
Jean-Marie CELLIER	Directeur d'études, EPHE, Toulouse	<i>Rapporteur</i>
Jean-Michel HOC	Directeur de recherche, CNRS, Nantes	<i>Directeur de thèse</i>
Xavier CHALANDON	Ingénieur-docteur, RENAULT, Guyancourt	<i>Examineur</i>
Yves CORSON	Professeur, Université de Nantes	<i>Président</i>

REMERCIEMENTS

La partie « remerciements » d'un manuscrit de thèse est celle qu'il est coutume de rédiger en dernier. Je suis par conséquent très heureux d'en arriver à ces quelques lignes...

Tout d'abord, je souhaite remercier mes encadrants de thèse, Jean-Michel Hoc et Franck Mars, car au-delà des conditions propices au bon déroulement de ce travail doctoral, ils m'ont offert toute la bienveillance nécessaire sans pour autant contraindre mes choix.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, Daniel Mestre et Jean-Marie Cellier en qualité de rapporteurs, Xavier Chalandon en qualité d'examineur et Yves Corson en qualité de président du jury. Je suis très heureux que tous aient accepté de consacrer de leur temps à la lecture et à l'évaluation de mon travail.

Je tiens à remercier le groupe ergonomie cognitive de chez Renault, et particulièrement Jean-François Forzy et Myriam El-Jaafari, avec qui nous avons collaboré pour la réalisation d'une étude, ainsi que David Toffin et le centre technique de simulation pour leur savoir faire en termes de simulation à la conduite.

Je voudrais aussi remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mes travaux, particulièrement Robert pour son aide dans les moments clés.

J'adresse mes remerciements à Audrey qui malgré l'approche de son mariage a pris le temps de corriger mes (trop) nombreuses fautes de ponctuation et de langue française, à Julien pour ses commentaires sur ce manuscrit et à ma maman qui a accepté de relire, sous fortes contraintes de temps, certaines parties de mon travail.

Pour conclure avec ces quelques remerciements, je voudrais saluer la « dream team » du RU composée principalement de doctorants pour nos discussions, nos rigolades, nos baby (Jordan+Thibault > Didier+Julien) - quick - absurdes séances, nos instants kebab, nos parties de poker...

Finalement, je voudrais adresser une pensée à mes parents qui, à n'en pas douter, placeront ce manuscrit fièrement dans la bibliothèque familiale.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	3
CADRE GÉNÉRAL	7
I. LE CONDUCTEUR	7
I.1 <i>L'activité de conduite automobile</i>	7
I.2 <i>Les modalités sensorielles sollicitées</i>	12
I.3 <i>Les niveaux de traitement de l'information</i>	24
I.4 <i>Attention et conduite automobile</i>	28
I.5 <i>Les erreurs humaines en situation de conduite</i>	29
II. LA COOPERATION HOMME-MACHINE.....	35
II.1 <i>Définition du concept</i>	35
II.2 <i>Catégorisations existantes</i>	40
II.3 <i>Catégorisation adoptée</i>	52
III. LES ASSISTANCES AU CONTROLE LATERAL.....	55
III.1 <i>Automatisation du véhicule : l'esp</i>	55
III.2 <i>Perception augmentée</i>	60
III.3 <i>Les systemes d'avertissement aux sorties de voies</i>	64
III.4 <i>Les dispositifs coactifs</i>	73
III.5 <i>La délégation de fonction</i>	75
III.6 <i>L'automatisation complète</i>	79
IV. METHODES D'INVESTIGATION CHOISIES	80
IV.1 <i>Les moyens d'études expérimentaux : simulation de conduite ou conduite réelle ?</i>	81
IV.2 <i>Les conditions d'évaluation des assistances</i>	86
IV.3 <i>Les méthodes d'évaluation des assistances</i>	87

PARTIE EXPÉRIMENTALE 1 : APPORTS DES SYSTEMES D'AVERTISSEMENTS AUX SORTIES DE VOIE : AVERTISSEMENTS SIMPLES ET AMORÇAGE MOTEUR	89
I. INTRODUCTION.....	89
II. EXPERIENCE 1 : EFFICACITE COMPAREE DES ASSISTANCES AMORÇAGE MOTEUR ET AVERTISSEMENT AUX SORTIES DE VOIE.....	95
II.1 Introduction.....	95
II.2 Méthodes.....	97
II.3 Résultats.....	106
II.4 Discussion	124
II.5 Conclusion.....	130
III. EXPERIENCE 2 : VERS UNE MEILLEURE COMPREHENSION DE L'EFFICACITE DE L'AMORÇAGE MOTEUR ET PREMIERS ELEMENTS SUR SON ACCEPTABILITE COMPARATIVEMENT AUX SYSTEMES D'AVERTISSEMENTS AUX SORTIES DE VOIES.....	132
III.1 Introduction.....	132
III.2 Méthodes.....	135
III.3 Résultats.....	141
III.4 Discussion	151
IV. CONCLUSIONS SUR LA PARTIE EXPERIMENTALE 1	156
 PARTIE EXPÉRIMENTALE 2 : RÉGULATION LATÉRALE AUTOMATISÉE ET ADAPTATIONS COMPORTEMENTALES ASSOCIEES	 159
I. INTRODUCTION.....	159
II. METHODES.....	162
II.1 Participants	162
II.2 Matériel	162
II.3 Assistance utilisée	164
II.4 Procédure.....	165
II.5 Analyse des données	166
III. RESULTATS.....	168
III.1 Comportements des conducteurs sur les commandes du véhicule	168
III.2 Analyse des stratégies visuelles.....	172
III.3 Verbalisations spontanées relatives à la coopération homme-machine	175
IV. DISCUSSION.....	177
V. CONCLUSION.....	181

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES	183
RÉFÉRENCES.....	191
LEXIQUE	211
ANNEXES	213
I. PLANS EXPERIMENTAUX DE LA PARTIE EXPERIMENTALE 1	213
II. PLAN EXPERIMENTAL DE LA PARTIE EXPERIMENTALE 2	215

RÉSUMÉ

Le cadre général de ce travail doctoral porte, tout d'abord, sur la conduite automobile et les processus cognitifs impliqués dans cette activité. La complexité et le caractère multiple de l'activité de conduite y est présenté. Par la suite, les modalités sensorielles mises en jeu par la situation de conduite sont introduites et leurs implications au sein de l'activité illustrées. Les différents niveaux de traitement de l'information sont ensuite éclairés d'exemples issus de l'activité de conduite. L'attention et les différents types d'erreurs humaines, à l'origine des accidents, sont finalement abordés. Le cadre théorique propose également une classification des différents types d'assistance au contrôle latéral envisageables en fonction des problématiques associées en termes de coopération homme-machine. Un état de l'art des travaux relatifs aux dispositifs d'assistance au maintien de la trajectoire du véhicule est proposé, ainsi qu'une discussion sur la pertinence de la simulation de conduite pour ces questions de recherche.

Trois études expérimentales ont été réalisées dans le cadre de ce projet de thèse. Les deux premières études s'intéressent à des dispositifs d'assistance modérément intrusifs, qui sont déclenchés lorsqu'un certain niveau de risque de sortie de voie est atteint. Elles comparent un dispositif d'assistance (amorçage moteur) fournissant un indice moteur directionnel sur le volant, à des dispositifs d'avertissement plus traditionnels, qu'ils soient auditifs (ex. : avertissement sonore latéralisé) ou vibratoires (ex. : vibration du volant ou du siège). Un deuxième objectif était d'évaluer l'efficacité de dispositifs multimodaux (auditif et vibratoire) en comparaison aux systèmes unimodaux. Une analyse détaillée des manœuvres réalisées en situation de sortie de voie (situation critique) ou de contournement d'obstacle (situation d'invalidité des dispositifs) a été menée. Les résultats indiquent que l'ensemble des dispositifs d'assistance évalués a aidé les conducteurs dans leurs manœuvres de rétablissement en situation critique, mais l'amorçage moteur s'est révélé réduire davantage les durées de sorties de voies que les dispositifs d'avertissement. Les comparaisons réalisées laissent penser que cette amélioration des performances ne peut s'expliquer uniquement par un effet propre à l'utilisation de la modalité haptique, ni même par le fait que l'information directionnelle soit délivrée sur le volant. Les résultats soutiennent plutôt l'hypothèse d'une intervention directe de l'amorçage moteur au niveau de l'action, contrairement aux avertissements qui ne semblent fournir une aide qu'au diagnostic de la situation. La deuxième étude a également permis de recueillir des données subjectives de manière à fournir des premiers éléments sur l'acceptabilité des différents dispositifs d'assistance au contrôle latéral. Les résultats tendent à indiquer une préférence des conducteurs pour un avertissement sonore latéralisé, plutôt que pour l'amorçage moteur, en opposition avec les

résultats observés en termes d'efficacité des dispositifs. La combinaison de ces deux modalités d'assistance semble être une piste prometteuse pour atteindre un compromis entre acceptabilité et efficacité.

La troisième étude expérimentale porte sur un dispositif d'assistance auquel les conducteurs délèguent le contrôle latéral du véhicule. Ce type d'assistance pourrait donner lieu à des difficultés de reprise en main lorsque la situation sort des limites de validité de l'assistance. De telles difficultés, accompagnées d'une suspicion de négligence des informations visuelles, ont déjà été observées avec un dispositif d'assistance similaire (Hoc et al., 2006). Ces incommodités pourraient être causées par l'apparition d'un phénomène de contentement, se traduisant notamment par la négligence des informations visuelles utiles à la réalisation de la fonction déléguée. Les résultats recueillis dans la présente étude confirment clairement des difficultés de reprise en main lorsque l'assistance est mise en situation d'invalidité. L'analyse des stratégies visuelles a révélé des modifications dans les prises d'information sans pour autant établir incontestablement leur rôle dans le phénomène de contentement. Les difficultés de reprise en main sont plus probablement dues à l'ajout d'une tâche supplémentaire en présence de l'assistance. Avec le dispositif d'assistance les conducteurs devaient décider de reprendre le contrôle, puis d'effectuer cette action, tandis que sans assistance seule l'exécution était nécessaire.

Les travaux présentés se sont focalisés sur la situation de coopération homme-machine en conduite automobile au travers l'étude des comportements mis en œuvre par les conducteurs. Ainsi, chaque étude expérimentale comporte une analyse des interférences entre conducteurs et dispositif(s) d'assistance.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans nos sociétés, l'activité de conduite automobile est devenue quotidienne pour beaucoup de personnes. L'utilisation massive d'automobiles sur nos routes n'est pas sans présenter certains inconvénients. Au premier rang des problèmes régulièrement soulevés figure souvent la sécurité routière. Dans l'optique de rendre l'activité de conduite automobile plus sûre, diverses solutions ont été envisagées. Les mesures de lutte contre l'insécurité routière peuvent être regroupées en trois grandes catégories. Les premières sont relatives à la prévention. Ainsi, et particulièrement en France, de vastes campagnes de prévention routière ont été menées au cours des dernières années. Ces campagnes ont des objectifs variés, tels que la sensibilisation aux effets néfastes de la fatigue et de l'alcool ou encore aux bénéfices associés au port de la ceinture de sécurité. Le deuxième grand moyen de lutte contre l'insécurité routière concerne la répression. En France, par exemple, depuis fin 2003 nos routes ont vu fleurir plus d'un millier de radars automatiques fixes. Finalement, un troisième type de mesures visant à l'amélioration de la sécurité routière a été envisagé : il s'agit d'aider la conduite automobile.

Les travaux entrepris au cours de ce travail se concentrent autour de l'usage d'aides à la conduite. Ces aides, nommées **assistances à la conduite**, font intervenir des automates dont les fonctions sont variées. L'introduction d'assistances implique une modification de l'activité de conduite, car elle engendre l'instauration de relations entre automates et conducteurs. Dans le cadre de ce doctorat, il sera fait référence aux relations entre automates et conducteurs en faisant usage du cadre théorique de la coopération homme-machine. La coopération apparaît lorsque les actions de l'un des deux agents du système homme-machine influent sur celles de l'autre agent. Dans la logique de coopération, lorsqu'un agent entre en interférence avec l'autre, c'est pour en faciliter l'activité. La gestion des interférences entre assistance(s) et conducteur constitue ainsi, l'enjeu central de la coopération homme-machine. Dans le cas d'une coopération entre un automate et un individu, la relation coopérative n'est pas nécessairement symétrique. L'objectif attendu de ce type de coopération est de gérer les interférences homme-machine de manière à faciliter l'activité humaine. Les assistances sur lesquelles notre attention s'est portée, sont destinées à aider les conducteurs dans le contrôle de leur trajectoire. En conduite automobile, la trajectoire du véhicule comprend deux dimensions : une dimension longitudinale (régulation de la vitesse) et une dimension latérale (régulation de la position dans la voie). Les expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse se sont focalisées sur des assistances portant directement sur la dimension latérale du contrôle de la trajectoire. L'activité de guidage latéral du véhicule est très routinière et repose essentiellement sur des habiletés sensori-motrices acquises avec le développement de l'expertise. L'intervention d'une assistance dans

le contrôle latéral du véhicule implique la genèse d'interférences au niveau des habiletés perceptivo-motrices autorisant un contrôle fluide et rapide de la trajectoire. Il est alors nécessaire de faire en sorte que les actions de l'assistance s'insèrent efficacement dans les boucles de contrôle perceptivo-motrices.

Ces boucles de régulation sensori-motrices ou perceptivo-motrices correspondent au contrôle d'une activité, quelle qu'elle soit. En d'autres termes, cela comprend l'ensemble des ajustements moteurs effectués de manière routinière sur la base d'informations perceptives prélevées dans l'environnement. L'objectif de la transmission d'information à ce niveau de contrôle routinier serait de se rapprocher d'une intervention qui se fonde complètement dans le contrôle d'une activité fortement automatisée. Fournir une information qui soit compatible avec les boucles de régulation sensori-motrices nécessite des connaissances sur le fonctionnement de ces dernières. L'activité de guidage du véhicule repose en grande partie sur des habiletés perceptivo-motrices et offre un terrain expérimental propice à l'étude de cette problématique. Il s'agit donc d'un contexte privilégié pour évaluer la coopération homme-machine avec une assistance visant à intervenir au niveau des boucles de régulation perceptivo-motrices. L'usage d'une telle assistance « intégrée » au contrôle permettrait aux conducteurs d'être plus efficaces qu'avec une assistance plus traditionnelle, les informant au travers d'informations symboliques nécessitant l'intervention de processus cognitif de plus haut niveau. Si cette assistance s'intègre parfaitement à l'activité des conducteurs, il est également probable qu'elle soit mieux appréciée par ces derniers.

En outre, il paraît nécessaire d'imaginer un moyen pour transmettre l'information. Parmi les choix à faire sur la manière de transmettre l'information, il est particulièrement important de déterminer quel(s) canal(aux) sensoriel(s) utiliser. En rapport à ces aspects, l'influence du canal sensoriel utilisé dans l'activité de coopération nous a semblé être une question d'intérêt principal. Dans le prolongement de cette préoccupation, la question du bénéfice de la combinaison de plusieurs modalités sensorielles à la transmission d'informations a également fait l'objet de notre attention. En situation de conduite, l'ensemble des modalités sensorielles (exception faite du goût) peuvent être sollicitées. Cet état de fait rend particulièrement propices les comparaisons entre assistances sollicitant un ou plusieurs canaux sensoriels. La comparaison directe de divers canaux sensoriels ainsi que la redondance des informations (même information fournie simultanément par plusieurs canaux sensoriels) autorise également la production immédiate de recommandations pour la conception d'assistances.

Finalement, nous avons souhaité déterminer quels sont les effets de l'automatisation complète d'une tâche motrice habituellement réalisée par les individus, à la fois dans leurs comportements perceptifs et moteurs. D'un point de vue moteur, la suppression de la tâche habituellement réalisée modifie-t-elle les aptitudes des individus à effectuer à nouveau cette

tâche en cas de besoin ? D'un point de vue perceptif, la suppression de la tâche motrice entraîne-t-elle des modifications dans les stratégies de prise d'informations dans l'environnement ? Dans cette optique, une assistance remplaçant complètement les conducteurs dans la réalisation du contrôle latéral a été étudiée. D'un point de vue plus ergonomique, la description des effets induits par ce type d'assistance permettra de déterminer l'incidence du désengagement des conducteurs d'une tâche motrice. Puis, par la suite, de lutter contre l'apparition d'éventuels phénomènes néfastes introduits par ce désengagement.

Afin de répondre aux questions posées par la thèse, deux parties expérimentales précédées d'un cadre théorique composé de quatre grands axes ont été développées. Le premier axe présente un état de l'art portant sur l'humain en situation de conduite. Le deuxième axe porte sur le cadre théorique de référence, celui de la coopération homme-machine. Le troisième axe fait état des travaux portant spécifiquement sur les assistances au contrôle latéral en conduite automobile. Finalement, un quatrième axe relatif aux méthodes d'investigations choisies dans la thèse sera présenté. La partie expérimentale a été scindée en deux parties distinctes. La première partie met relate deux expériences visant principalement à évaluer et comprendre le fonctionnement d'une assistance, ayant comme fonction de faciliter la mise en œuvre d'une manœuvre de correction de trajectoire en agissant au niveau des coordinations sensori-motrices. L'importance du(des) canal(aux) sensoriel(s) utilisé(s) pour véhiculer l'information y sera aussi abordée. La seconde partie expérimentale répondra aux questions relatives à l'introduction d'une assistance remplaçant les conducteurs dans la gestion du contrôle latéral du véhicule.

CADRE GÉNÉRAL

I. LE CONDUCTEUR

Le développement des compétences nécessaires au déplacement dans un environnement varié, avec un véhicule aux caractéristiques diverses (notamment en termes de dimensions), ne nécessite que quelques heures d'apprentissage. La mise en œuvre de ces apprentissages implique la réalisation de plusieurs tâches de natures très différentes, le plus souvent en parallèle. Par exemple, le guidage du véhicule implique la gestion de déplacements à des vitesses largement supérieures à celles autorisées par la locomotion humaine. Le conducteur se situe également dans un environnement routier, fréquenté par d'autres usagers et dont les comportements sont à prendre en considération pour mener à bien sa propre activité. Les relations avec ces autres usagers sont régies par des règles communément acceptées (code de la route ou règles tacites) auxquelles les conducteurs doivent se conformer.

Dans un premier temps, ce chapitre sera consacré à la description de la situation de conduite automobile et aux activités humaines nécessaires à son bon déroulement. Les caractéristiques perceptives (et le traitement de l'information) impliquées lors de la conduite automobile, seront ensuite présentées. Finalement, les erreurs humaines en situation de conduite seront abordées et mises en relation avec les données issues de l'accidentologie.

I.1 L'ACTIVITE DE CONDUITE AUTOMOBILE

Bien que ce travail ne thèse ne porte pas sur l'activité de conduite dans son ensemble, une description succincte de la dite activité est nécessaire afin d'en comprendre le caractère multidimensionnel. Les conducteurs sont placés au sein d'un système incluant le véhicule et son environnement (Figure 1). En situation de conduite normale, les conducteurs prélèvent d'une part des informations dans leur environnement et sur leur véhicule et, d'autre part, agissent sur leur véhicule principalement via le pédalier, le volant et le choix du rapport de vitesse. La perception de l'environnement est fonction des déplacements réalisés, mais la perception de l'environnement guide aussi les conducteurs dans le choix de leurs déplacements. De plus la situation de conduite place les conducteurs dans un environnement dynamique. Ainsi, l'environnement évolue même si le conducteur n'agit pas sur les commandes de son véhicule. Une manœuvre de freinage implique, par exemple, de prévoir la distance nécessaire à l'arrêt du véhicule. L'environnement routier évolue même lorsque le véhicule est à l'arrêt, par exemple lorsqu'un conducteur est arrêté à un feu tricolore. Le caractère dynamique de l'environnement implique une certaine anticipation de la part des opérateurs (Cellier, 1996). En conduite automobile, cette anticipation portera principalement sur les effets des actions entreprises, sur l'état futur du véhicule au sein de l'environnement,

ainsi que sur les priorités temporelles à accorder aux différentes tâches relatives à la conduite. Afin de faire évoluer leur véhicule dans l'environnement routier, les conducteurs doivent en effet mener à bien différentes tâches. Ces tâches sont souvent catégorisées en trois grands ensembles (ex. : Stanton, Young, Walker, Turner & Randle, 2001) que sont le guidage, la navigation et l'identification de risques.

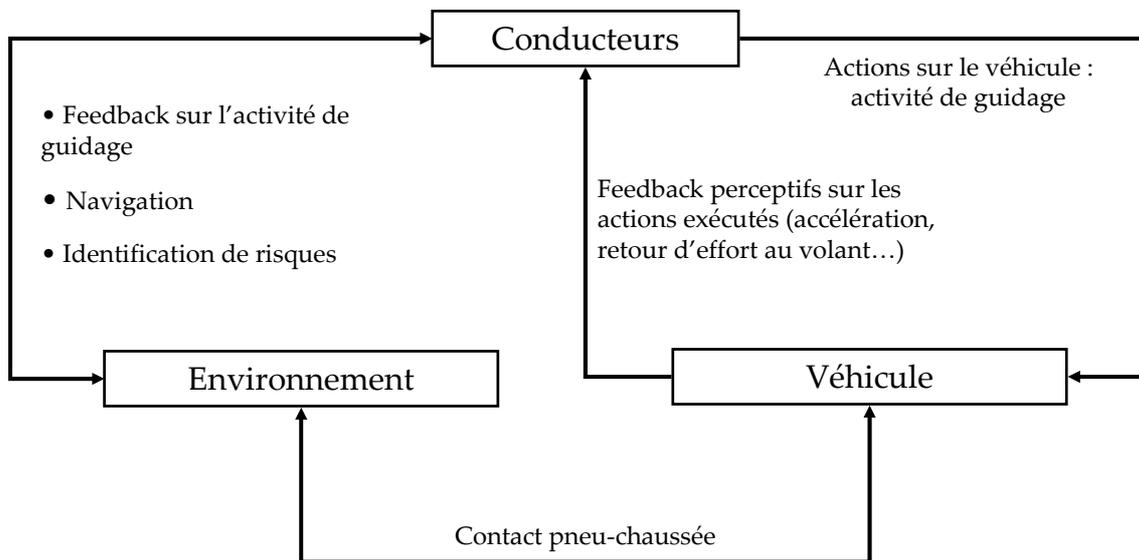


Figure 1. Situation de conduite normale simplifiée.

Les actions opérées par les conducteurs sur leur véhicule renvoient à l'**activité de guidage**. Le guidage du véhicule se décompose en deux dimensions : le contrôle longitudinal et le contrôle latéral. Le contrôle longitudinal consiste en la gestion de la vitesse du véhicule en fonction de contraintes imposées à la fois par l'infrastructure routière (état et géométrie de la route), par les autres usagers (trafic) et par la signalisation routière (limitations de vitesse). Le contrôle latéral consiste à gérer le positionnement latéral du véhicule, c'est-à-dire principalement à maintenir le véhicule dans sa voie de circulation, bien que les situations de dépassements ainsi que certaines manœuvres d'évitement nécessitent parfois des choix de positions latérales différentes. Les deux dimensions du guidage d'un véhicule sont également modulables par l'état dans lequel se trouve la voiture et/ou par l'état du conducteur (degré de vigilance, taux d'alcoolémie...). Bien que souvent dissociées, les composantes latérales et longitudinales de l'activité de guidage sont très liées. À titre d'exemple, la négociation d'un virage implique principalement le maintien de la position latérale ; cependant une vitesse adaptée facilite cette tâche. Suite à l'exécution d'une action, les conducteurs disposent à la fois de retours (feedbacks) perceptifs directs fournis par le véhicule et d'un retour à plus long terme fonction des déplacements du véhicule dans l'environnement. Ces retours permettent aux conducteurs d'ajuster leurs actions à venir.

Sur une échelle de temps plus importante, les informations (principalement visuelles) sur l'activité de guidage contribuent à l'accomplissement de l'**activité de navigation**. En effet, ces informations renseignent sur le positionnement du véhicule dans l'environnement routier. De fait, les conducteurs ont la possibilité de choisir quel chemin ils souhaitent emprunter et donc de tourner à droite ou à gauche aux intersections. Une tâche de navigation préalable consiste à déterminer à l'avance le chemin pour se rendre à un point donné.

Finalement, la recherche d'informations dans l'environnement permet aux conducteurs d'identifier des sources de dangers potentiels. L'**identification de risques** repose sur les indices prélevés sur la route elle-même (ex. : état de la route), le contexte routier (ex. : trafic) et les autres usagers. Il existe trois grands types de dangers en conduite automobile. Les dangers dits dynamiques qui sont constitués des autres véhicules susceptibles d'entrer en collision avec le véhicule conduit, des piétons et cyclistes. Les dangers dits statiques tels que les constructions, les panneaux publicitaires, les déformations de la route, les trottoirs ou encore les glissières de protection. Et les dangers dits sociétaux que sont les limitations de vitesse, les signalisations routières telles que les « stops », les « cédez le passage » ou les feux tricolores.

La Figure 1 fait simplement état du contact entre les pneus et la chaussée en termes d'interactions Environnement - Véhicule. Il s'agit d'une vision très réductrice car les actions entreprises par les conducteurs sur leur véhicule ont également des répercussions potentielles sur l'environnement (ici les autres usagers tels que d'autres véhicules, piétons ou encore cyclistes). De manière réciproque certains indices prélevés dans l'environnement peuvent être utilisés pour donner un retour perceptif supplémentaire aux conducteurs. C'est notamment le cas lors du développement d'assistances à la conduite ayant pour finalité d'avertir les conducteurs d'un risque. Ces retours perceptifs additionnels émanant du véhicule ont fait l'objet de notre attention dans le cadre de cette thèse.

Comme décrit précédemment, l'activité de conduite est une activité complexe regroupant trois sous-activités principales elles-mêmes composées de plusieurs tâches. De manière à dissocier les tâches importantes de celles qui le sont moins, la terminologie de tâche primaire et tâche secondaire de conduite est fréquemment employée. Toutefois, et comme le souligne Hollnagel (2006), il n'existe pas de consensus sur les définitions de ce que sont exactement les tâches de conduite primaires et secondaires. De plus, il apparaît que la définition de la **tâche de conduite primaire** est mouvante dans le temps. Ainsi, Hollnagel (2006) retrace l'évolution de cette notion au fil du temps. En 1938, Gibson et Crooks définissent la tâche de conduite primaire comme l'ensemble des actions relevant du guidage du véhicule. Dans les années 1970, Mc Ruer, Allen, Weir et Klein (1977) définissent la tâche de conduite primaire selon trois niveaux de contrôle (niveau de contrôle pré-cognitif, de poursuite et de guidage).

Finally, since 1985 with the work of Michon, the driving activity is considered as a set of simultaneous tasks but with requirements as well temporal as cognitive different.

In the approach proposed by Michon (1985), the notions of primary and secondary task do not appear more clearly. This author proposes a categorization of driving tasks according to a hierarchical organization in three levels: strategic, tactical and operational (Figure 2).

The **strategic** level is the highest level in the hierarchy. The tasks performed here require a high cognitive investment. However, drivers are not subjected to strong temporal constraints. It is at this level that decisions concerning the planning of the route and the choice of the itinerary are made.

At the **tactical** level, drivers decide on the actions they will perform in the instants that follow. Cognitive requirements are less important than at the higher level; on the other hand, activities performed at this level are performed under time pressure. Among the tasks related to this level of activity, the decision to overtake another vehicle is a good example. Drivers must in fact decide if they will attempt an overtaking depending on the traffic, the speed of the vehicle they want to overtake, their own speed... This decision requires therefore the taking into account of various elements (cognitive cost) and must intervene quickly (temporal constraint) in order to perform the overtaking in time. There are many other situations involving the tactical level such as the decision to give way, to stop at a pedestrian crossing or even the choice of the speed of negotiation of a curve.

The **operational** level corresponds to the execution of decisions made at the higher levels. The cognitive cost associated with this level is very low in contrast to the temporal constraints which are very strong. It is the lowest level of the hierarchy where drivers often perform automatically the actions of longitudinal and lateral regulation of the vehicle (ex.: realization of the overtaking of another vehicle).

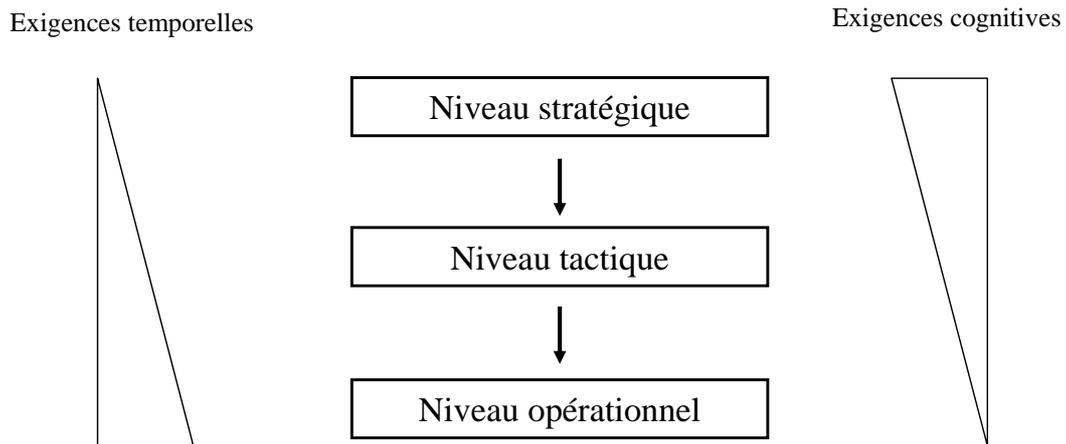


Figure 2. Découpage de l'activité de conduite selon Michon (1985).

Aujourd'hui, le découpage de l'activité de conduite proposée par Michon (1985) s'est largement imposé. Même si ce découpage a été établi indépendamment de la notion de tâches primaires et secondaires, il est principalement destiné aux activités directement liées à l'activité de conduite. En général, la terminologie tâches primaires / secondaires de conduite est utilisée de manière à dissocier les activités de guidage du véhicule, de navigation et d'identification de risques de tout ce qui n'est pas directement lié à la conduite. Selon Hollnagel (2006), il est entendu que les tâches de conduite primaires recouvrent entre autres, les tâches de réaction à l'apparition de dangers, de maintien dans la voie, de contrôle de la vitesse, de l'inter-distance entre véhicules tandis que les tâches secondaires correspondent au reste, et particulièrement aux tâches pouvant interférer avec les tâches de conduite primaires.

Pour **synthétiser** cette première partie, l'activité de conduite automobile est une activité complexe où les conducteurs ont à interagir à la fois avec leur véhicule et leur environnement. Du point de vue des conducteurs, l'activité de conduite est composée de trois caractéristiques principales que sont le guidage, la navigation routière et l'identification de risques. Certaines tâches sont plus importantes que d'autres d'où la distinction faite entre les activités dites de conduite primaire et celles dites de conduite secondaire. Finalement, il est fréquemment fait usage du découpage en trois niveaux hiérarchisés de l'activité de conduite proposée par Michon (1985). Ce modèle propose un découpage opéré selon les exigences cognitives et temporelles de la tâche considérée. Ainsi, les niveaux stratégique, tactique et opérationnel sollicitent respectivement de moins en moins les capacités cognitives des conducteurs, mais requièrent des réponses de plus en plus rapides.

I.2 LES MODALITES SENSORIELLES SOLLICITEES

L'objectif de cette partie consacrée à la perception est de décrire les différentes modalités sensorielles impliquées en conduite automobile. Les modalités sensorielles les plus sollicitées seront présentées. Les systèmes visuel, auditif, vestibulaire et les informations haptiques seront abordées suivant la même démarche. Cette dernière consiste en la description des principales caractéristiques de la modalité sensorielle considérée, puis de l'usage qui en est fait en conduite automobile. Par la suite, notre intérêt s'est porté sur quelques exemples d'utilisation de la modalité sensorielle considérée pour fournir des informations sensorielles supplémentaires aux conducteurs.

I.2.1 *La vision*

La vision occupe une place prépondérante dans notre vie quotidienne. Cette modalité sensorielle est considérée comme un sens indivisible. Toutefois, deux grands types de vision sont à distinguer. Premièrement, la vision dite centrale, très limitée en termes d'angle visuel, et qui autorise à une très bonne discrimination (ex. : permet la lecture). De fait, l'œil humain permet d'avoir une forte acuité visuelle uniquement dans une zone très limitée. Cette vision est parfois appelée vision fovéale, terminologie issue du nom de la partie de la rétine où est recueillie l'énergie lumineuse relative à une petite partie de la scène visuelle (celle où est fixé le regard). Et deuxièmement, la vision dite périphérique (tout le reste de l'énergie lumineuse reçue par la rétine) qui ne permet pas de discrimination fine mais qui est notamment sensible aux mouvements. Ces deux dimensions de la perception visuelle sont complémentaires. Ainsi, lorsqu'un objet en mouvement dans l'espace (par exemple un véhicule en déplacement) est détecté en vision périphérique, le regard peut être redirigé vers cet objet afin de l'identifier avec précision. La redirection du regard est assurée par des mouvements très rapides des yeux appelés saccades oculaires. Lors d'une saccade, les yeux « sautent » d'un endroit à un autre de la scène visuelle. La vision occupe une place particulière en rapport aux autres modalités sensorielles. C'est pourquoi, en cas d'informations non congruentes émanant de différentes modalités sensorielles, la vision est très souvent la modalité prépondérante (ex. : Freides, 1974 ; Rock & Harris, 1967). On parle alors de dominance sensorielle (ex. : Bertelson & De Gelder, 2004).

En conduite automobile, la vision occupe une place déterminante et c'est principalement sur la base de ces informations qu'est menée l'activité de guidage du véhicule (Summala, Nieminen & Punto, 1996). De fait, les stratégies visuelles adoptées par les conducteurs ont été et continuent d'être très étudiées. Un corpus de connaissances, sur les prises d'informations visuelles en situation de conduite, s'est ainsi créé. Le modèle désormais classique de Donges (1978) décompose l'activité de guidage du véhicule en deux processus parallèles alimentés par des informations visuelles distinctes. Le premier processus concerne

les informations visuelles proches des conducteurs et permet principalement un ajustement rapide de la position latérale du véhicule. Le second processus porte sur l'utilisation d'informations visuelles plus lointaines et permet d'anticiper sur les portions de route à venir. Ce modèle est soutenu par certains résultats expérimentaux. Land et Horwood (1995) mettent en évidence expérimentalement la distinction entre une zone visuelle proche et une zone visuelle plus lointaine. Lors de cette étude menée sur simulateur de conduite, le champ visuel des conducteurs était réduit. La scène visuelle était découpée en dix zones horizontales d'un degré d'angle visuel en hauteur. Les résultats rapportés révèlent que lorsque seule une partie lointaine de la route était visible, les conducteurs adoptaient des trajectoires latérales bien lisses (positionnement latéral sans à coup) pour les virages dans leur ensemble. Toutefois, d'un point de vue plus microscopique, des écarts latéraux important du véhicule dans la voie étaient observés. À l'inverse, lors de la seule présence d'informations visuelles proches, les trajectoires latérales empruntées n'étaient pas lisses pour les virages dans leur ensemble, mais le véhicule était maintenu à proximité du centre de la voie.

L'analyse de la position du regard des conducteurs a montré qu'en entrée et en cours de virage, les conducteurs passent beaucoup de temps à regarder dans une région proche du point tangent (Land & Lee, 1994). Le point tangent n'est pas figé dans l'espace, mais au contraire, évolue en fonction de la position (latérale comme longitudinale) du conducteur. C'est un point particulier de la scène visuelle où la courbure du virage semble s'inverser du point de vue du conducteur (Figure 3). En termes de flux optique, le point tangent correspond au point où le sens du flux horizontal change. Pour le cas d'un virage à gauche, comme présenté en figure 3, le flux optique horizontal est orienté vers la droite au-delà du point tangent. Il est nul sur le point tangent, puis est orienté vers la gauche entre le point tangent et le véhicule conduit. Il n'y a donc pas de mouvement de flux horizontal lorsque les conducteurs regardent ce point. Cette caractéristique en ferait un point qui attire naturellement le regard des conducteurs. D'après Land et Lee (1994), les conducteurs utiliseraient le point tangent de manière à évaluer la courbure du virage en approche. Une telle utilisation du point tangent serait rationnelle, car une relation géométrique simple relie le degré de courbure d'un virage à l'angle entre la direction du regard des conducteurs passant par le point tangent et la direction du véhicule (Land & Lee, 1994). Cependant, d'autres hypothèses ont été proposées pour rendre compte de l'utilisation du point tangent (Boer, 1998 ; Salvucci & Gray, 2004 ; Mars, 2008a).

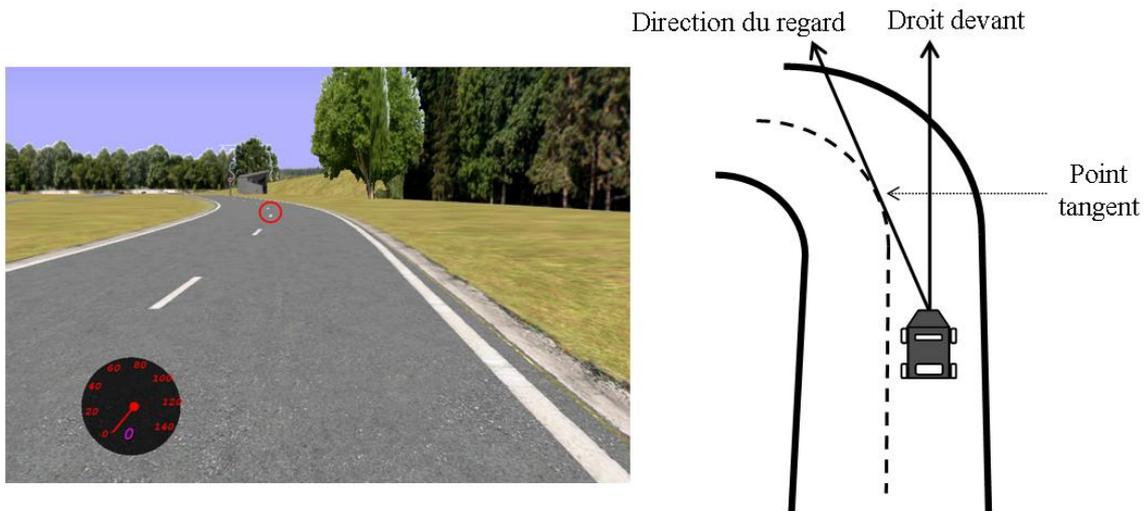


Figure 3. Deux représentations du point tangent. A gauche, le point tangent est marqué par un cercle rouge. A droite, schéma du même virage vu de dessus.

Wilson, Stephenson, Chattington et Marple-Horvat (2007) confirment les observations de Land et Lee (1994). Par ailleurs, ces auteurs mettent en évidence une corrélation entre le mouvement des yeux (notamment en direction du point tangent) et le mouvement du volant subséquent. Lors de cette étude sur simulateur de conduite, il était demandé aux conducteurs de conduire le plus vite possible sur un circuit, soit en condition visuelle normale, soit avec la moitié (gauche) de la scène visuelle voilée. Dans cette dernière condition, le dispositif n'obstruait pas complètement la vision mais ne permettait pas la distinction du point de corde. En condition de demi-scène visuelle voilée, certains conducteurs continuaient à regarder dans la partie voilée, tandis que d'autres ne regardaient pratiquement plus cette partie de la scène visuelle. Les conducteurs qui persistaient à regarder dans la partie voilée alors que le point tangent ne peut pas être distingué sont plus performants que les autres conducteurs (temps pour réaliser le circuit plus court). Il est remarquable de constater que les conducteurs persistant à regarder du côté voilé de la scène visuelle, regardent la région du point tangent (alors qu'elle ne peut être distinguée). Les auteurs interprètent ces résultats comme étant le fait d'une coordination entre le regard et les actions effectuées sur le volant, interprétation renforcée par d'autres résultats expérimentaux (Chattington, Wilson, Ashford & Marple-Horvat, 2007). Cette coordination semble fonctionner même lorsque les mouvements oculaires ne fournissent pas l'information visuelle recherchée.

Mars (2008a), lors d'une étude menée sur simulateur de conduite, précise le lien existant entre le positionnement du regard dans la scène visuelle et le guidage latéral du véhicule. En comparaison à une condition contrôle où le regard des conducteurs était laissé libre, les conducteurs avaient pour consigne de suivre du regard un point cible aux propriétés

dynamiques identiques au point tangent. Il s'agissait soit directement du point tangent, soit d'un point situé à la même distance et évoluant de manière identique mais décalé latéralement. Les résultats recueillis révèlent l'absence de détérioration du contrôle de la trajectoire lorsque le suivi de cible était imposé. Le positionnement latéral moyen restait identique à la condition contrôle (virages coupés) lorsque le regard des conducteurs restait positionné sur la voie de circulation (au centre ou à une position intermédiaire entre le centre de la voie et le point tangent). Les conducteurs avaient tendance à moins couper les virages lorsque leur regard était contraint sur le point tangent ou plus à l'intérieur du virage. En revanche, la stabilité du contrôle était équivalente quelle que soit la position de la cible. Dans tous les cas, une amélioration de la stabilité de la trajectoire par rapport à la situation contrôle est observée. Cette étude met clairement en évidence le lien étroit existant entre la position du regard des conducteurs et leur gestion du contrôle latéral du véhicule. Elle confirme la pertinence à regarder dans la région du point tangent. Les propriétés dynamiques du point tangent plutôt que la relation géométrique que sa direction entretient avec la courbure de la voie semblent être déterminantes.

La plupart des études portant sur l'analyse des stratégies visuelles en conduite automobile utilisent la direction du regard des conducteurs comme marqueur de l'activité visuelle. Par conséquent, pour bon nombre des études présentées, c'est la vision centrale qui est étudiée. Toutefois, les conducteurs font également usage de la vision périphérique, notamment pour guider leur véhicule (Summala, Niemi & Punko, 1996). En mettant ces éléments en relation avec ceux apportés par Donges (1978), il semble que les conducteurs portent le plus souvent leur regard (vision centrale) assez loin dans la scène visuelle, de manière à décider de la trajectoire globale à emprunter pour les portions de route à venir. La gestion de la trajectoire à court terme (position latérale) se ferait principalement sur la base d'informations visuelles émanant de la vision périphérique. Summala et al. (1996) ont mis en évidence, particulièrement chez les conducteurs expérimentés, la capacité à utiliser la vision périphérique afin de maintenir leur véhicule dans la voie de circulation. Au cours de cette étude, les conducteurs avaient à conduire à faible allure sur une ligne droite de 210 mètres. Ils avaient également pour consigne de fixer leur regard (vision centrale) sur des tâches, impliquant de regarder un dispositif situé à différentes excentricités dans le véhicule. De manière générale, les conducteurs étaient capables de réaliser une grande partie de la distance demandée (environ 88 % en moyenne). L'usage de la vision périphérique en conduite semble toutefois nécessiter un apprentissage. En effet, les performances des conducteurs novices étaient altérées même lorsque la tâche mobilisant leur regard était située à proximité du compteur de vitesse (faible excentricité), tandis que les performances des conducteurs expérimentés n'étaient altérées que lorsque la tâche se situait au milieu du tableau de bord (excentricité moyenne).

L'usage du canal sensoriel visuel pour fournir des informations sensorielles supplémentaires aux conducteurs est souvent évité, car le nombre d'informations visuelles à prendre en compte par les conducteurs est déjà très important. Néanmoins, il existe une technologie issue de l'aviation permettant de surimposer à la scène visuelle d'autres informations. Aujourd'hui, dans le domaine de l'automobile, ces dispositifs dits « tête haute » offrent de nombreuses possibilités afin d'enrichir la scène visuelle des conducteurs. La figure 4 présente notamment un exemple de scène visuelle avec un afficheur tête haute proposant au conducteur des informations sur les limitations de vitesse et une aide à la navigation. Mestre, Mars, Durand, Vienne et Espié (2004, 2005) ont d'ailleurs suggéré qu'une mise en évidence du point tangent dans la scène visuelle par l'intermédiaire de ces dispositifs pourrait faciliter le contrôle de la trajectoire.



Figure 4. Les afficheurs tête haute : l'image de gauche en illustre le principe de fonctionnement et celle de droite donne un exemple dans une scène visuelle.

1.2.2 L'audition

Historiquement, l'audition est la modalité sensorielle la plus étudiée après la vision. En situation de conduite, c'est aussi la modalité sensorielle la plus sollicitée après la vision. L'audition est utilisée par les conducteurs pour se tenir informés aussi bien de l'état de leur véhicule que de celui de leur environnement. Les bruits environnants le véhicule sont autant d'indices pouvant renseigner les conducteurs sur l'état du monde les entourant. Par exemple, le bruit produit par un autre véhicule participe à l'estimation de sa vitesse et parfois même au sens de son déplacement (ex. : véhicules équipés d'un système émettant un son lorsqu'ils reculent). Les sons émis par le véhicule conduit apportent des indices sur son bon fonctionnement (régime moteur adapté, absence de sons inhabituels...) et sur l'état de la route (bruits de roulement ou présence de graviers). L'usage des informations auditives revêt également un enjeu sécuritaire. L'avertisseur sonore en est une bonne illustration. Bien que souvent dévoyée, l'utilisation de l'avertisseur est originellement destinée à prévenir d'un danger. Par exemple, lors de la négociation d'un virage sans visibilité sur une route étroite à double sens, les conducteurs font usage de leur avertisseur pour prévenir de leur arrivée. De

cette manière, si deux conducteurs doivent négocier le virage en même temps, ils peuvent adapter leur vitesse. En ville, jouer de l'avertisseur peut également s'avérer être utile, essentiellement pour alerter d'un danger qui semble ne pas avoir été pris en compte.

De plus, le bruit généré par le moteur du véhicule conduit participe à l'activité de guidage. Mc Lane et Wierwille (1975) ont montré qu'en situation de simulation de conduite, le manque d'informations auditives entraîne une augmentation de la vitesse. Ce manque d'informations auditives donne également lieu à des difficultés d'estimation de la vitesse de conduite (Horswill & Mc Kenna, 1999). Matthews et Cousins (1980) expliquent la capacité des conducteurs de petites voitures à estimer leur vitesse plus finement que ceux de grosses voitures mieux insonorisées.

Le canal auditif est également utilisé pour fournir des informations supplémentaires aux conducteurs. Ainsi, Deartherage (1972) suggère l'usage d'équipements auditifs lorsque le message à transmettre est court et simple, qu'il n'y sera pas fait référence ultérieurement, qu'il ne transmet pas d'informations de nature spatiale et/ou qu'il requiert une action immédiate. Dans le cadre de la conduite automobile, l'utilisation du canal auditif à la place de la vision évite d'entrer en concurrence directe avec l'activité de conduite visuo-motrice. De plus, l'usage d'alertes auditives permet d'attirer l'attention visuelle plus rapidement que l'usage de dispositifs visuels (Colavita, 1974). Sur les véhicules modernes, diverses informations sont transmises via cette modalité sensorielle. À titre d'exemple, un son est émis lorsqu'une personne présente dans le véhicule ne porte pas sa ceinture de sécurité, ou encore lorsque contact éteint, le conducteur ouvre sa portière sans avoir éteint les feux de son véhicule. D'autres systèmes aident les conducteurs à se garer en émettant un son dont la fréquence augmente à mesure que le véhicule se rapproche d'un obstacle.

1.2.3 Les informations haptiques

Les informations haptiques se définissent comme la combinaison des informations tactiles et kinesthésiques. C'est pourquoi elles sont parfois nommées informations tactilo-kinesthésiques. Le terme haptique est apparu au milieu du XX^{ème} siècle à l'initiative du psychologue hongrois Révész (1934). La perception haptique se distingue de la perception cutanée de par la mise en jeu des récepteurs musculo-tendineux et articulaires (Hatwell, Streri & Gentaz, 2000). La perception haptique comprend donc en plus d'une déformation de la peau (informations tactiles), les activités musculaire, tendineuse et articulaire (informations kinesthésiques). Les informations kinesthésiques sont concomitantes du déplacement dans l'espace d'un ou de plusieurs segments du corps humain.

En conséquence, l'utilisation de cette modalité est particulièrement fréquente en conduite automobile dès lors que les conducteurs agissent sur les commandes de leur véhicule. Ainsi, lors de l'activité de guidage du véhicule, toutes les actions des conducteurs sur le volant et le

pédalier impliquent ce type de perception. À titre d'exemple, quand un conducteur décide d'actionner la pédale de frein de son véhicule il reçoit : des informations tactiles (contact entre son pied et la pédale) ; des informations kinesthésiques sur la variation et l'état de longueur ainsi que la force exercée par les muscles impliqués dans le mouvement de freinage ; et des informations fournies par la position angulaire des articulations des segments concernés. De la même manière, lorsque les conducteurs tournent leur volant, ils disposent d'informations tactiles (contact main-volant) et d'informations kinesthésiques fournies par les muscles tendons et articulations impliqués dans ces mouvements.

Ces informations haptiques émanent du retour de force au volant. Ce retour est proportionnel à l'amplitude de l'angle au volant pour une vitesse et des conditions d'adhérence données. Le retour de force, à quelques légères distorsions, augmente proportionnellement avec l'accélération latérale du véhicule (Essma, 2000). Les retours de forces apportent donc continuellement des informations relatives à la dynamique du véhicule. Un conducteur est capable de s'adapter à différentes lois de restitution des retours de forces. C'est ce qui lui permet de changer de véhicule sans éprouver de grandes difficultés. À condition, toutefois, que ces lois de restitutions des retours de forces restent corrélées à l'angle au volant (Toffin, Reymond, Kemeny & Droulez, 2003). Dans une étude sur simulateur, des conducteurs ont été confrontés à plusieurs lois de restitutions des retours haptiques au volant. Les résultats indiquent que les conducteurs sont en mesure de contrôler leur véhicule convenablement tant que les retours d'efforts sont une fonction, linéaire ou non-linéaire, de l'angle au volant. En revanche, un retour de force absent ou inversé rend la conduite pratiquement impossible.

Classiquement, la modalité haptique implique donc un mouvement actif de la part de l'humain. La perception haptique est sollicitée lors de l'exploration manuelle d'objets par exemple. L'utilisation de ce canal pour la transmission d'informations consiste à détourner la modalité de sa fonction principale afin d'en faire un outil pour rediriger l'attention de l'utilisateur. Ce détournement de la modalité haptique fait apparaître une nuance par rapport à l'intervention classique de la modalité dans l'activité humaine. En effet, l'humain ne met pas en jeu activement un membre. Au contraire, un objet en contact avec lui se met en mouvement ou entre en vibration. C'est la raison pour laquelle certains auteurs font parfois usage du terme vibro-tactile.

Par exemple, Van Erp, Van Veen, Saturday, Jansen et Werkhoven (2006) parlent de stimulation vibro-tactile lors de l'usage de gilets de stimulation tactile. Ces gilets sont composés d'un nombre variable de vibreurs destinés à fournir une information directionnelle à leurs utilisateurs (ex. : figure 5). L'usage de tels dispositifs permet à ses utilisateurs de déterminer une direction externe en correspondance avec le point de stimulation vibro-tactile concerné (Van Erp, 2005). Il est fait usage de ce type de dispositifs

dans diverses situations. Par exemple, l'apport de ce dispositif a été mis en évidence afin d'aider les pilotes d'hélicoptères à maintenir leur appareil en vol stationnaire (Van Erp, Veltman, Van Veen & Oving, 2003) et à voler à une altitude donnée (Van Erp, Veltman & Van Veen, 2003). Des essais ont également été réalisés avec un dispositif destiné à indiquer à des joueurs de football dans quelle direction ils devaient regarder afin d'améliorer leurs prises d'informations (Van Erp et al., 2006). Appliqués au domaine de la conduite automobile, des vibreurs peuvent être disposés dans le siège du conducteur afin de lui fournir des informations directionnelles. Van Erp et Van Veen (2004) montrent l'apport de ce dispositif en conduite automobile pour aider les conducteurs dans leur tâche de navigation.



Figure 5. Exemples de gilets de stimulation vibro-tactiles. À gauche, un pilote d'hélicoptère portant un gilet vibro-tactile avec 12 colonnes et 5 lignes de vibreurs. À droite une photo avec les joueurs du club de football néerlandais du PSV Eindhoven. D'après Van Erp et al. (2006).

I.2.4 Les informations vestibulaires

Le vestibule, organe sensoriel situé dans l'oreille interne, se compose de récepteurs otolithiques et de canaux semi-circulaires. Les récepteurs otolithiques comprennent l'utricule et le saccule qui codent respectivement les accélérations linéaires (gravitaires et liées aux déplacements) horizontales et verticales. Les canaux semi-circulaires, en forme de demi-cercles, sont disposés selon trois plans orthogonaux correspondant aux trois plans de l'espace et codent les accélérations angulaires. De par son anatomie et ses caractéristiques physiologiques, le vestibule est à même de renseigner sur les caractéristiques dynamiques (amplitude, direction et temps) des déplacements linéaires et angulaires de la tête et du corps en entier, en conjonction avec la proprioception nucale (De Jung, De Jong, Cohen & Jongkees, 1977). Le vestibule est connu pour avoir une activité majeure dans la stabilisation du regard ainsi que dans l'équilibration. Une activité réflexe (réflexe vestibulo-oculaire) permet

notamment à l'humain de maintenir son regard sur un objet fixe lors de déplacements de la tête.

En conduite automobile, l'appareil vestibulaire renseigne des accélérations du véhicule étant donné que les conducteurs se déplacent avec leur véhicule. Page et Gresty (1985) observent des illusions de déplacements ainsi qu'une diminution de la performance de conduite chez des patients vestibulo-lésés. Ces résultats ont été reproduits sur simulateur de conduite avec des individus normaux dont l'appareil vestibulaire était rendu inopérant de manière temporaire (stimulation calorique ; Clarke, Clarke & Scherer, 1996).

Lors de la prise de virages, Raymond, Kemeny, Droulez et Berthoz (2001) observent une corrélation forte entre la vitesse de conduite et l'accélération latérale maximum. Ainsi, plus la vitesse de conduite est élevée, moins les conducteurs tolèrent une accélération latérale importante. Les auteurs interprètent ce résultat comme un ajustement de la vitesse en fonction de l'accélération latérale perçue. Dans la vie de tous les jours, le franchissement du seuil d'accélération latérale maximum déterminerait l'atteinte d'une vitesse trop importante. Les conducteurs réduiraient donc leur vitesse lors du dépassement de ce seuil. Ils auraient aussi la possibilité de l'augmenter dans le cas où l'accélération latérale courante est en deçà du seuil toléré. Cet ajustement de la vitesse serait modulable en fonction des marges de sécurité dynamiques (c'est-à-dire du seuil d'accélération toléré en fonction de la vitesse de déplacement) propres à chaque individu.

Cette modalité sensorielle se prête peu à la transmission d'informations aux individus. Pour des raisons sécuritaires, il n'est pas actuellement envisageable de stimuler directement l'appareil vestibulaire ou de modifier la position de la tête en conduite automobile, sauf à toucher à la dynamique du véhicule, par exemple en agissant sur le châssis du véhicule de manière à incliner l'ensemble du véhicule. À notre connaissance il n'a jamais été fait usage de cette modalité sensorielle à des fins de transmission d'information.

1.2.5 La redondance sensorielle

Jusqu'alors, chaque modalité sensorielle a été présentée isolément. Néanmoins, dans la majeure partie des activités humaines, la perception résulte de l'intégration des différentes informations sensorielles disponibles. Bertelson et De Gelder (2004) développent l'exemple d'une explosion afin de mettre en évidence la disponibilité de différentes informations sensorielles en provenance d'un même événement. Ainsi, lors d'une explosion, des informations à la fois lumineuses, auditives, de chaleur et de pression sur la peau sont perçues. Ces informations sensorielles perçues quasi simultanément correspondent à des co-occurrences valides (dans la terminologie de Bertelson et De Gelder, 2004). De nouveau, la conduite automobile ne fait pas exception. Prenons l'exemple d'une situation de freinage faisant suite à un brusque ralentissement du véhicule suivi. Les conducteurs disposent

d'informations visuelles, auditives, haptiques et vestibulaires. Visuellement ils perçoivent une réduction de la distance les séparant du véhicule précédent et des bruits de freinage sont également audibles (particulièrement lors d'un freinage d'urgence avec des crissements de pneumatiques). Des informations haptiques (action de freinage sur le pédalier et pression accrue des mains sur le volant due à l'inertie du corps) et vestibulaires liées à la décélération du véhicule sont également disponibles. Comparativement à la situation d'explosion, dans notre exemple, les conducteurs sont à l'origine de certaines de leurs perceptions sensorielles. Toutefois, il est d'autres événements moins fréquents où les perceptions multisensorielles sont passives. Par exemple, lorsqu'un véhicule vient heurter le véhicule conduit, les conducteurs disposent d'informations visuelles, auditives (bruit de froissement de la tôle), haptiques (le corps est déplacé dans l'espace par le choc tout en restant en contact avec certaines parties de l'habitacle) et vestibulaires (déplacement du corps).

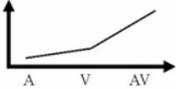
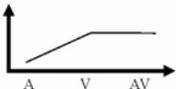
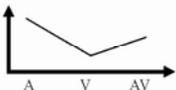
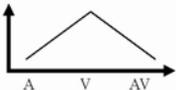
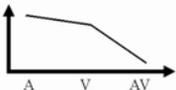
Selon Bertelson et De Gelder (2004, p.141) :

« L'existence d'informations co-occurentes valides émanant de différentes modalités sensorielles crée pour les systèmes perceptifs, aussi bien naturels qu'artificiels, l'opportunité d'améliorer leurs performances. »

Appliquée au domaine des assistances à la conduite, la transmission d'informations pourrait être améliorée en fournissant simultanément la même information via des modalités sensorielles différentes. Il sera uniquement considéré ici la combinaison de deux modalités sensorielles. Wickens et Gosney (2003) proposent une classification des effets de redondances sensorielles suivant cinq niveaux de performance (Tableau 1).

- Dans le cas où la combinaison de deux modalités sensorielles produit de meilleures performances que chaque modalité prise isolément, cette combinaison entre dans la catégorie « **Gestalt** » sur les bases de la définition « le tout est différent de la somme des parties ».
- Si la combinaison des deux modalités sensorielles produit une performance égale à celle obtenue dans la meilleure des modalités prises isolément alors cette combinaison entre dans la catégorie « **le meilleur des deux mondes** ».
- Le niveau de performance est qualifié d' « **intermédiaire** » lorsque la combinaison des deux modalités sensorielles résulte en une performance se situant au milieu de celles recueillies pour les modalités sensorielles considérées isolément.
- Le dispositif multisensoriel entre dans la catégorie « **le moins bon des deux mondes** » lorsque ses performances sont comparables avec celles obtenues avec la modalité sensorielle ayant donné les performances les plus faibles.
- Finalement dans le cas où le dispositif combiné donne lieu à de moins bonnes performances que chacune des deux modalités, il entre dans la catégorie « **Anti-Gestalt** ».

Tableau 1. Catégorisation des effets de redondances, d'après Wickens & Gosney (2003). Les modalités visuelles (V) et auditives (A) et leur combinaison (AV) ont été utilisées comme exemple. Le tableau présente les noms, critères de classification et une représentation graphique pour chacune des cinq catégories. Les graphiques représentent des mesures de performances hypothétiques où un plus haut niveau représente une meilleure performance.

Gestalt	$AV > A, V$	
Le meilleur des deux mondes	$AV = \text{meilleur}(A, V)$	
Intermédiaire	$AV = (A + V) / 2$	
Le moins bon des deux mondes	$AV = \text{moins bon}(A, V)$	
Anti-Gestalt	$AV < A, V$	

Plusieurs études ont mis en évidence un bénéfice lors de l'association de deux modalités sensorielles (cas de figure « Gestalt »). Les modalités sensorielles les plus souvent combinées sont la vision et l'audition. Dans le cadre de la conduite automobile, l'usage de dispositifs multimodaux a été étudié principalement pour l'aide à la navigation embarquée. Dingus, Hulse, McGehee et Manakkal (1994) montrent une diminution des ressources visuelles (nombre et durée de fixations réduits) allouées au dispositif d'aide à la navigation embarquée lorsqu'une information auditive est ajoutée à l'information visuelle. Ces résultats suggèrent qu'avec les informations auditives, des ressources visuelles sont rendues disponibles, permettant ainsi aux conducteurs de passer plus de temps à regarder la route. Srinivasan, Yang, Jovanis, Kitamura et Anwar (1994) ont également montré une amélioration des performances en combinant les modalités auditives et visuelles et ce, comparativement à la modalité visuelle seule. Dans cette étude portant sur des dispositifs d'assistance à la navigation embarquée, l'ajout d'indications auditives à une carte électronique (écran situé dans le véhicule) entraîne de meilleures performances en termes de nombre d'erreurs d'orientation, du temps passé à regarder l'écran ainsi que de la charge mentale subjective (voir Wickens & Seppelt, 2002 pour une revue).

Fournir des informations multimodales congruentes à propos d'un même événement engendre des effets facilitateurs. Ainsi, des temps de réponse plus courts ont été enregistrés avec un dispositif multimodal (informations auditives et visuelles) comparativement aux dispositifs uni-modaux (ex. : Chan & Chan, 2006 ; Selcon, Taylor, & McKenna, 1995).

Toujours pour l'exemple de l'aide à la navigation embarquée, la combinaison d'informations auditives et vibro-tactiles s'est également révélée être efficace. Van Erp et Van Veen (2004) rapportent un effet de type « Gestalt » en termes de temps de réponse à des messages navigationnels lors de la combinaison d'informations visuelles et vibro-tactiles. Ho, Reed et Spence (2006) observent également une diminution des temps de réponse au freinage ainsi qu'une augmentation des marges de sécurité, en ajoutant aux informations auditives des informations vibro-tactiles (Figure 6). Ces résultats sont observés pour des assistances destinées à alerter les conducteurs d'une collision imminente avec le véhicule précédent.

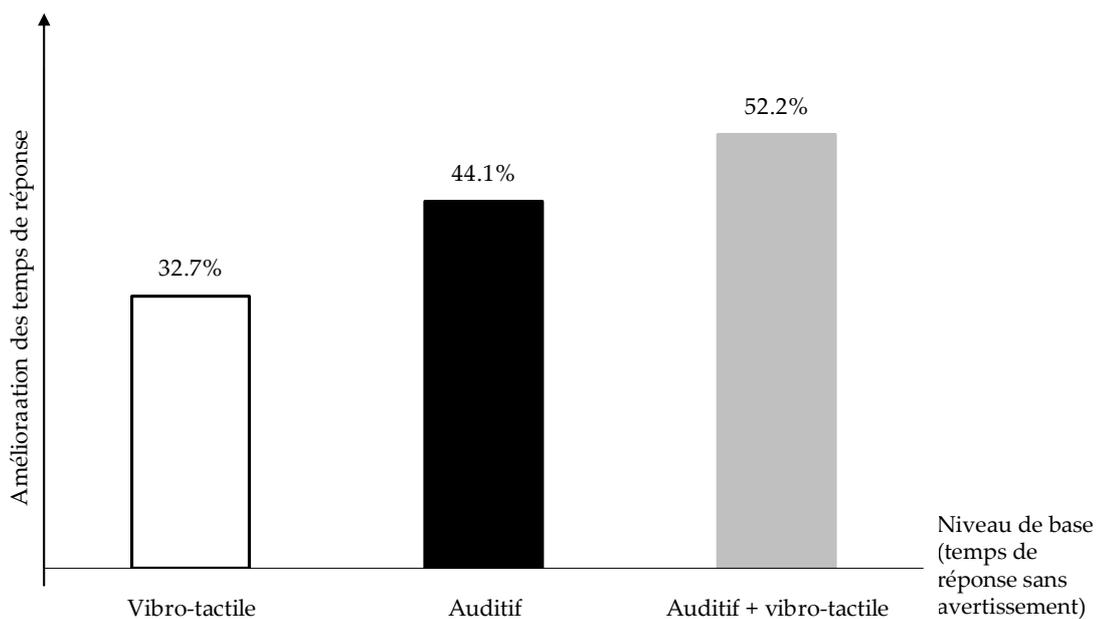


Figure 6. Amélioration des temps de réponse au freinage en rapport à la condition contrôle. En condition contrôle aucune information additionnelle n'était transmise aux conducteurs. D'après Ho, Reed & Spence (2006).

Toujours pour l'aide à la navigation embarquée, Liu (2001) rapporte un effet de type « meilleur des deux mondes » avec un dispositif multimodal, en comparaison avec chacune des deux modalités utilisées isolément. Les performances avec le dispositif multimodal étaient similaires à celles obtenues avec l'audition seule et supérieures à celles avec la vision seule. La combinaison d'informations sensorielles ne s'accompagne donc pas systématiquement d'une amélioration des performances. À notre connaissance, les cas de figure « intermédiaires », « moins bon des deux mondes » et « anti-gestalt » n'ont jamais été rapportés pour des dispositifs d'assistance à la conduite automobile.

De manière **synthétique**, cette partie a mis en exergue les modalités sensorielles impliquées en conduite automobile. Le rôle prépondérant de la vision a été souligné et les stratégies visuelles adoptées par les conducteurs ont été décrites. Les modalités visuelle, mais aussi auditive et haptique, peuvent être utilisées pour transmettre des informations aux conducteurs. La redondance sensorielle et la variété d'effets envisagés en termes de performances, lorsqu'elle est utilisée pour informer les conducteurs, ont été présentées.

I.3 LES NIVEAUX DE TRAITEMENT DE L'INFORMATION

Dans la partie précédente (cadre général, partie I.2), les différentes modalités sensorielles sollicitées en conduite automobile ont été décrites. Ce chapitre s'intéresse aux processus nécessaires aux traitements des informations perceptives ainsi recueillies. La psychologie cognitive considère l'individu comme un système traitant de l'information. Ce traitement de l'information peut être réalisé à différents niveaux. L'objectif ici est de présenter ces différents niveaux de traitement et leurs caractéristiques principales, puis de les illustrer par des exemples issus de l'activité de conduite.

Dans le domaine de la psychologie ergonomique, les travaux de Rasmussen (1983, 1986) sur les niveaux de contrôle de l'activité font référence. Cet auteur propose une catégorisation en trois niveaux où les comportements sont régis sur la base d'habiletés, de règles ou de connaissances (Figure 7). Dans cet ordre, les niveaux de traitement sont de plus en plus coûteux en ressources attentionnelles symboliques.

Le niveau des comportements basés sur les **habiletés** (*Skill-based Behavior*) se situe au plus bas dans la hiérarchie du traitement de l'information. Rasmussen (1983) qualifie les comportements issus de ce type de traitement de fluides, automatisés et largement intégrés par les individus. Les actions motrices prennent place sans recours aux ressources attentionnelles symboliques de la part des individus et reposent sur des signaux. Les signaux correspondent à des entrées sensorielles, ne nécessitant pas de renvoi à des contenus avant d'être exploités. Entrent dans cette catégorie tous les comportements routiniers, fruits d'un apprentissage (ontogenèse ou développement de l'expertise) et nécessitant généralement une exécution rapide. Le coût cognitif associé est très faible, laissant libres les ressources attentionnelles symboliques. Les habiletés sportives sont une bonne illustration de comportements basés sur des habiletés. Nombre de gestes sportifs sont effectivement réalisés de manière très automatisée. L'exécution de ces gestes est faiblement conscientisée, si bien que l'expert est rarement capable de décomposer un geste technique pourtant parfaitement maîtrisé. Dans le cadre de la conduite automobile, les activités liées au guidage du véhicule sont largement automatisées. Par exemple, un conducteur en train de négocier

un virage ne calcule pas en permanence la modification angulaire à opérer sur le volant pour contrôler sa trajectoire. Ce contrôle est effectué de manière routinière sans nécessité d'y prêter attention.

Le niveau des comportements basés sur les **règles** (*Rule-based Behavior*) occupe une position intermédiaire dans la hiérarchie de traitement de l'information. Pour l'opérateur, il s'agit ici d'appliquer certaines règles, dont il dispose, afin de répondre efficacement à une situation qui lui est familière. Ces comportements s'appuient sur des signes. Rasmussen (1983) définit ces signes comme étant le lien entre certaines caractéristiques de l'environnement et des activités à réaliser. Dans ce cadre, l'interprétation des caractéristiques de l'environnement est donc minimale. Dans le domaine des activités sportives, les comportements basés sur des règles sont fréquents. Au cours d'un échange, un tennisman va par exemple choisir quel coup réaliser en fonction de sa propre position sur le terrain, de la position de son adversaire et du sens de son déplacement. Ces caractéristiques environnementales seront prises en compte sans grand investissement en ressources attentionnelles symboliques. En conduite automobile, un conducteur va décider d'entreprendre un dépassement en fonction de sa vitesse, de celle du véhicule qu'il souhaite dépasser, de la topologie de la route... Autant de caractéristiques qui, basées sur des connaissances antérieures (règles), détermineront le choix de l'action à entreprendre. Rasmussen (1983) avertit lui-même que la limite entre les comportements basés sur des habiletés et ceux basés sur des règles n'est pas assez distincte. De plus, cette limite est dépendante de l'expertise et de l'état d'activité dans lequel se trouvent les individus. Il existe toutefois une méthode permettant de distinguer les comportements dirigés par des règles de ceux dirigés par des habiletés. En effet, les comportements dirigés par des règles peuvent être explicités verbalement sur demande, contrairement aux comportements basés sur des habiletés.

Le niveau des comportements basés sur les **connaissances** (*Knowledge-based Behavior*) est le niveau le plus coûteux en ressources dans la hiérarchie du traitement de l'information. Ce niveau de traitement permet de réagir à des situations ne pouvant être gérées par les deux autres niveaux de traitement. En effet, celui-ci met en jeu la manipulation de symboles définis comme des représentations mentales complexes, d'où la terminologie de traitement symbolique de l'activité. Par conséquent, ce niveau est gourmand en temps, connaissances et ressources attentionnelles symboliques. Les individus novices dans une activité ont souvent recours à ce type de traitement. C'est aussi le cas des experts lorsqu'ils sont confrontés à une situation nouvelle. Au tennis par exemple, face à un adversaire inconnu, les joueurs ont besoin de se construire une représentation des coups forts et des coups faibles de leur adversaire. Cette représentation leur permettra ensuite de mieux appréhender les futurs coups qui seront joués par l'adversaire. Ce processus de construction est lent et nécessite un recours à des informations issues de l'expérience et stockées en mémoire. En conduite automobile, ce niveau est notamment impliqué lors de la navigation. Lorsqu'un événement

imprévu (ex. : accident routier impliquant la fermeture d'une route qu'il était prévu d'emprunter) oblige à modifier l'itinéraire adopté, les conducteurs doivent faire appel à leur connaissance du réseau routier de manière à adapter leur itinéraire le mieux possible.

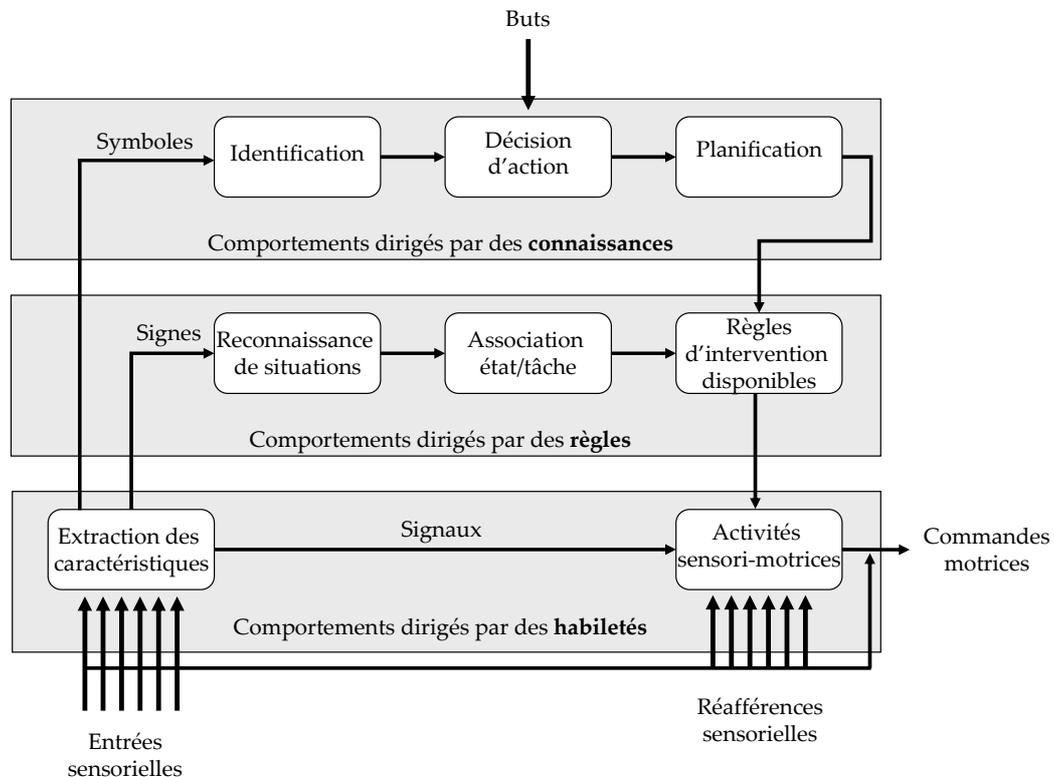


Figure 7. Les différents niveaux de contrôle de l'activité. Adapté de Rasmussen (1983).

Dans le prolongement des écrits de Rasmussen (1983, 1986), Hoc et Amalberti (2007) proposent un modèle reposant sur le croisement de deux dimensions : celle des niveaux de traitement de l'information et celle de l'origine des données de contrôle (internes ou externes).

Ces auteurs s'inspirent du modèle « automatismes-règles-connaissances » présenté ci-dessus et, par soucis de simplification, définissent simplement deux niveaux de traitement de l'information. Ces niveaux se définissent en fonction de la nature plus ou moins abstraite des informations traitées, d'où l'usage de la terminologie de **niveaux d'abstraction du contrôle** de l'activité. Les deux niveaux de traitement sont le niveau symbolique et un niveau subsymbolique. Dans ce cadre, la frontière entre les niveaux de traitements est définie par l'usage ou non de symboles pour traiter les informations à disposition des individus. Contrairement à l'usage de signaux (niveau subsymbolique), le recours à des symboles implique une interprétation de la part des individus (niveau symbolique).

Le **traitement de l'information symbolique** est défini comme séquentiel et coûteux en attention symbolique. De par son recours à des symboles, le temps de traitement est élevé et se déroule étape par étape. Par conséquent, ce type de contrôle ne permet pas l'exécution de

certains mouvements devant être réalisés rapidement. Par exemple, l'engagement au tennis nécessite l'exécution rapide de plusieurs mouvements ; si ce geste sportif est contrôlé au niveau symbolique, le geste est décomposé et donc rendu inefficace de par le temps de traitement nécessaire. Néanmoins, ce niveau de traitement permet d'accéder au contenu conceptuel des informations traitées. En conséquence, les concepts acquis dans une situation pourront être généralisés à d'autres situations.

Le niveau **subsymbolique** est routinier et repose sur des signaux ne nécessitant pas de renvois à des symboles (ex. : engagement au tennis). Contrairement au contrôle symbolique, le contrôle subsymbolique n'implique que peu de ressources attentionnelles symboliques. Toutefois l'attention des individus peut être mobilisée par une activité contrôlée de manière subsymbolique. Toujours pour l'exemple d'un engagement au tennis, le joueur regarde la balle lors de l'exécution de son geste. Durant ce geste, il ne lui est donc pas possible de réaliser une autre activité subsymbolique impliquant l'attention visuelle.

Les deux niveaux de traitements peuvent être exécutés en parallèle. C'est pourquoi il nous est par exemple possible de lire lorsque nous marchons ou prenons le tramway. La marche et l'équilibration sont deux activités hautement subsymboliques ne nécessitant pas de ressources attentionnelles symboliques au contraire de la lecture. En revanche, il nous est difficile de réaliser deux activités de nature symboliques en parallèle, d'où l'utilisation du paradigme de la double tâche afin de déterminer la nature symbolique ou non d'une activité. En conduite automobile, l'introduction de nouveaux appareillages comme les téléphones portables n'impliquerait pas nécessairement de dégradations des performances de conduite en termes de guidage. La tâche de conduite étant principalement subsymbolique et une conversation de nature symbolique. Toutefois la majeure partie des études montrent une altération des performances de conduite lors de l'usage d'un téléphone portable en conduite (ex. : Alm & Nilsson, 1995). Cette dégradation des performances est liée à un défaut d'attention globale et non pas à une distraction liée à la manipulation du téléphone (pas de différences entre les appareillages mains libres et téléphones portables classiques ; voir pour une revue Cairda, Willness, Steel & Scialfa ; sous presse).

De manière **synthétique**, les divers niveaux de traitement de l'information ont été présentés au travers des modèles théoriques de Rasmussen (1983, 1986) et de Hoc et Amalberti (2007). Rasmussen classe les comportements des individus en trois catégories que sont les comportements dirigés par des habiletés, ceux dirigés par des règles et ceux dirigés par des connaissances. Hoc et Amalberti distinguent quant à eux, deux niveaux : le niveau de traitement de l'information symbolique et le niveau de traitement de l'information subsymbolique.

I.4 ATTENTION ET CONDUITE AUTOMOBILE

L'attention ne constitue pas une thématique abordée directement dans le cadre de cette thèse. Cependant, elle est impliquée dans toute activité humaine dès lors que l'individu est considéré comme un système de traitement de l'information de capacité limitée. Camus (1996, p. 84) précise que dans cette optique « *l'attention doit être considérée comme un phénomène limitatif qui opère une sélection parmi toutes les informations sollicitant le sujet à un moment donné.* ». Notre système cognitif n'étant pas capable de traiter l'ensemble des informations disponibles. En ce sens, « *les processus attentionnels sont des instruments au service du contrôle cognitif de l'activité : en magnifiant l'activité des représentations cognitives correspondant aux cibles, et en inhibant celles de distracteurs non pertinents, l'attention permet d'isoler dans le flux continu de notre activité mentale les représentations particulières dont a besoin la mémoire de travail pour alimenter les fonctions exécutives.* »

La notion d'attention se distingue de celle de vigilance, cette dernière est un état physiologique pré-requis à l'exercice de l'attention pour laquelle la composante cognitive est majeure. La vigilance étant définie selon Mackworth (1950) comme « *un état de préparation nécessaire pour détecter et répondre au plus petit changement apparaissant dans l'environnement à des intervalles de temps aléatoires* ». Le domaine de la conduite automobile est un terrain propice à l'étude de ces deux notions (voir Chapon, Gabaude & Fort, 2006).

La distinction entre vigilance et attention est aisément transposable aux assistances à la conduite de type avertissement (cf. cadre général, partie III.3). Même si dans la pratique, la part relative de ces deux éléments est difficilement distinguable. La notion de vigilance n'est pas de nature sélective ; il s'agit du niveau d'alerte, d'activation cognitive de l'individu. La terminologie d'alerte est fréquemment employée lorsqu'il est question de vigilance. Un niveau d'alerte élevé est connu pour diminuer les temps de réponse des individus et s'apparente au concept de *precueing* (c'est à dire du pré-indiçage de la future réponse). L'augmentation du niveau d'alerte des individus tend vers l'optimisation des capacités de sélection et de traitement, facilitant ainsi les réponses sensori-motrices (Posner & Boies, 1971 ; Posner, 1975). Une assistance à la conduite destinée à avertir les conducteurs d'un danger quelconque a une incidence sur le niveau d'alerte des conducteurs et en conséquence peut améliorer leurs réponses motrices. En plus de son action sur l'alerte des individus, un avertissement fournit aux individus une indication sur l'état de l'environnement et peut ainsi donner lieu à des redirections attentionnelles. Par exemple, l'utilisation d'avertissements vibro-tactiles fournissant des informations spatiales se trouve être à l'origine de redirections attentionnelles, aussi bien vers l'avant que vers l'arrière du véhicule (Ho, Tan & Spence, 2005).

Wickens, Goh, Helleburg, Horrey et Talleur (2003) proposent une modélisation (modèle SEEV) de l'attention visuelle des conducteurs. Dans ce modèle conceptuel, l'allocation de

L'attention visuelle dans les différents champs visuels est régie par quatre facteurs liés aux informations visuelles : saillance, effort, attente et valeur. Ce modèle de l'exploration visuelle présente la particularité d'avoir été étendu à l'interaction avec des technologies embarquées dans le véhicule (Horrey, Wickens & Consalus, 2006). Le résultat principal qui est ressorti de cette deuxième étude est la mise en évidence d'une nette dissociation entre la vision centrale et la vision périphérique. La performance aux tâches nécessitant la vision centrale (ex. : technologies embarquées et réaction à l'apparition de dangers) sont liées aux stratégies d'explorations visuelles (positionnement du regard). Ces liens fonctionnels apparaissent être bien modélisés par les théories existantes. En revanche, les tâches comme le guidage latéral du véhicule reposent plutôt sur la vision périphérique. Par conséquent, la vision centrale affecte beaucoup moins les performances.

De manière **synthétique**, l'attention a été définie, puis distinguée de la notion de vigilance. Un parallèle entre cette distinction et les assistances à la conduite a ensuite été présenté.

I.5 LES ERREURS HUMAINES EN SITUATION DE CONDUITE

I.5.1 Introduction à l'erreur humaine

L'erreur humaine est inhérente à toute activité. Compte tenu de la diversité des situations dans lesquelles elle apparaît, de multiples catégorisations des erreurs humaines ont été proposées. Celle proposée par Reason (1990/1993) sera retenue ici pour son caractère transversal. Cet auteur catégorise en trois types les erreurs humaines, en dressant un parallèle avec le modèle « habiletés-règles-connaissances » de Rasmussen (Tableau 2). La terminologie de « **faute** » est réservée aux erreurs survenues dans une tâche impliquant une certaine mobilisation des ressources attentionnelles symboliques. La terminologie de « **ratés** » est préférée pour les erreurs commises lors de la réalisation d'activités automatiques.

Les ratés prennent donc place dans l'action, au niveau des automatismes (*skill-based behaviors* dans la terminologie de Rasmussen). Pour ce type d'erreur, le comportement n'est pas mauvais en lui-même, il est simplement exécuté à un mauvais endroit ou à un mauvais moment. Reason (1990/1993) rapporte une étude dans laquelle un opérateur désireux de fermer les vannes de décharge de pompe A et E, a par inadvertance fermé les vannes B et C. Il s'agissait d'un opérateur de centrale nucléaire (Oyster Creek en 1979). cette erreur a totalement coupé la circulation d'eau naturelle vers la zone du cœur. Dans ce cas, l'individu a correctement fermé les vannes. Simplement, une erreur s'est glissée au cours de l'action, dans cette activité lui étant très familière. Une omission de la part d'un individu entre également dans cette catégorie. En conduite automobile, ce type d'omission se rencontre dans l'activité de guidage du véhicule. Il peut s'agir, par exemple, d'un conducteur tournant

son volant de manière excessive lors de la négociation d'un virage. Cette sur-action au volant pourrait conduire son véhicule à sortir de la route.

Les fautes peuvent survenir à deux niveaux dans la hiérarchie des processus de traitement de l'information de Rasmussen. Le niveau des règles (*rule-based behavior*) et le niveau des connaissances (*knowledge-based behavior*). Les fautes de type *rule-based* sont majoritairement liées à une mauvaise classification de la situation rencontrée. En conséquence, la règle appliquée à cette situation est inadaptée. Une autre erreur a été commise à Oyster Creek à la suite de celle précédemment décrite : d'autres opérateurs ont confondu le niveau d'eau dans le blindage du réacteur avec un autre niveau. Ils ont alors appliqué une règle qui s'était révélée être satisfaisante antérieurement, mais inadaptée aux conditions d'urgences auxquelles ils ont été confrontés. Dans ce cas, la règle n'est pas mauvaise en elle-même mais son application est inappropriée. Les fautes commises à ce niveau peuvent également être le fait d'un rappel incorrect des procédures. En conduite automobile lorsque le véhicule suivi freine, une règle associée peut être de freiner tout en maintenant le véhicule dans sa voie. Dans une situation de carambolage sur voie rapide cette règle peut s'avérer moins adaptée qu'un freinage sur la bande d'arrêt d'urgence. Finalement les fautes de type *knowledge-based* sont liées à des limitations de ressources ou à un manque de connaissances. Dans ce cas, les actions des individus se déroulent conformément à ce qui a été planifié. Ce sont donc les plans eux-mêmes qui endossent la responsabilité de la faute.

Tableau 2. Relation entre les trois types d'erreurs et les niveaux d'abstraction de Rasmussen (1983). D'après Reason (1990/1993).

Niveau d'abstraction de l'activité	Type d'erreur
Niveau basé sur les automatismes	Ratés et lapsus de type <i>skill-based</i>
Niveau basé sur les règles	Fautes de type <i>rule-based</i>
Niveau basé sur les connaissances	Fautes de type <i>knowledge-based</i>

1.5.2 Les chiffres de l'accidentologie

Les accidents de la route impliquent dans 90 à 95% des cas une erreur humaine, soit comme facteur unique, soit comme facteur ayant contribué à la survenue de l'accident (Rumar, 1985). Une étude récente indique que 42000 personnes trouvent la mort chaque année aux États-Unis suite à un accident de la route, ce qui représente la principale cause de mortalité pour les 3-33 ans et la 7^{ème} cause de décès pour l'ensemble de la population (Subramanian, 2005). Parmi cet ensemble, les sorties de voie (sorties de route ou circulation sur une mauvaise voie) occupent une place importante. Les données émanant de l'accidentologie varient largement d'un pays à l'autre en raison d'infrastructures et de cultures différentes. Mais elles sont également fluctuantes d'une étude à l'autre en fonction des indicateurs

utilisés. Quoi qu'il en soit, de nombreuses études conduites dans divers pays mettent en avant les sorties de voie comme l'une des principales sources d'accidents. La part relative des sorties de voie dans l'ensemble des accidents est comprise entre 14.5% (ADAC, 2001) et 40% (Bar & Page, 2002). Cette proportion est encore plus importante lorsque c'est le nombre de tués sur les routes qui est considéré : 35% (ADAC, 2001) et 70% (Bar et Page, 2002). Najm, Koopmann, Boyle et Smith (2002) proposent une catégorisation des accidents faisant suite à une sortie de route selon deux dimensions : la situation du véhicule avant accident (ligne droite, virage, manœuvre) et la nature de la sortie de route (sortie faisant suite à une perte de contrôle liée à une vitesse excessive ou inappropriée, autres sorties de route). La combinaison de ces deux dimensions correspond aux six scénarios décrits dans le tableau 3. Ces six scénarios représentent 96.3 % de l'ensemble des accidents liés à une sortie de route et n'impliquant qu'un seul véhicule léger. Il n'a pas été possible de classer les 3.7 % des accidents restant en raison du manque d'informations sur leurs conditions de survenue.

Tableau 3. Nombre d'accidents suite à sortie de route arrondis au millier et issus de l'accidentologie aux États-Unis. D'après Najm et al. (2002).

	En ligne droite	En virage	En initiant une manœuvre	Total
Sortie de route	348 000	111 000	66 000	525 000
Perte de contrôle	218 000	162 000	51 000	431 000
Total	566 000	273 000	117 000	956 000

Najm, Smith et Yanagisawa (2007) ont récemment mené une étude portant sur l'accidentologie aux États-Unis et visant à établir une typologie des scénarios pré-accidentels. Cette typologie compte 37 scénarios pré-accidentels regroupés en 11 types d'accidents. Parmi ces types d'accidents figurent les sorties de route, catégorie incluant elle-même 11 scénarios pré-accidentels. Afin de prendre en compte l'ensemble des sorties de voie (y compris la circulation sur une mauvaise voie), trois autres scénarios pré-accidentels ont été comptabilisés. Ainsi, pour les accidents n'impliquant qu'un seul véhicule léger, plus de 66 % des accidents sont liés à des sorties de voie ou de route. Pour l'ensemble des accidents impliquant des véhicules légers, plus de 27 % des accidents sont liés à des sorties de voie ou de route. De plus, ces accidents représentent plus de 30% du coût économique impliqué par l'ensemble des accidents et plus de 36% en termes d'années fonctionnelles perdues.

1.5.3 Les sources d'accidents

L'activité de guidage du véhicule reposant principalement sur des habiletés sensori-motrices, les ratés (dans les termes de Reason), occupent une place prépondérante dans l'origine des

accidents. En effet, la grande majorité des erreurs commises par les conducteurs prennent place au cours de la réalisation de l'action. Aberg et Rimmö (1998) notent d'ailleurs une augmentation des erreurs d'inattention, rapportées par les conducteurs eux-mêmes, avec le développement de l'expertise. Les comportements des conducteurs sont de plus en plus automatisés (proportion de comportements dirigés par des habiletés croissante) à mesure que leur expertise se développe. Ainsi, la quantité d'erreurs dans l'action, de ratés, augmenterait avec le développement de l'expertise. Les conducteurs experts seraient alors plus enclins aux défauts d'attention que les conducteurs novices.

Les défauts d'attention (inattention et distraction) figurent souvent en tête de liste lorsqu'il s'agit d'expliquer les circonstances d'apparition des accidents. Aux États-Unis, les accidents faisant suite à un endormissement au volant causent chaque année à eux seuls la mort 1500 personnes et des blessures chez 40000 autres ; ce qui correspond à 25% des accidents dans lesquels un seul véhicule est impliqué (Tijernia et al., 1999). Selon Shinar (1978), près de la moitié de l'ensemble des accidents est attribuable à l'inattention d'un conducteur. De façon plus générale, de 25 à 30% des accidents routiers auraient pour origine un défaut d'attention du conducteur. Ces défauts d'attention englobent les inattentions (« regarde mais ne voit pas »), la somnolence ou l'endormissement et la distraction liée à une activité ou à un événement particulier (Wang, Knipling & Goodman, 1996). De manière spécifique aux sorties de route, Najm et al. (2002) rapportent que les conditions climatiques difficiles et les défauts d'attention contribuent pour près de 44% aux accidents liés à une sortie de route.

En conduite automobile, les capacités attentionnelles sont requises à la fois pour filtrer les informations sensorielles (attention sélective) et pour diriger la prise d'information vers un signal pouvant revêtir une importance toute particulière (attention passive). La distraction apparaît alors lorsqu'un conducteur prend du retard dans la prise d'informations nécessaires à la conduite. Cette prise de retard est le fait d'un événement, d'une activité, d'une personne ou d'un objet incitant le conducteur à soustraire son attention de la tâche de conduite (Steven & Minton, 2001 ; Stutts, Reinfurt, Staplin & Rodgman, 2001 ; Young, Regan & Hammer, 2003). La distraction en conduite automobile est un phénomène courant faisant partie intégrante de l'activité. Ainsi, en situation de conduite naturelle, un conducteur est engagé dans diverses activités distrayantes autres qu'une conversation pendant environ 16% du temps pendant lequel son véhicule est en mouvement (Stutts et al., 2003, 2005). L'apparition récente de nombreux équipements accroît les sources de distraction (Lee, Caven, Haake & Brown, 2001 ; Mollenhauer, Hulse, Dingus, Jahns & Carney, 1997 ; Parkes, 1993). Les téléphones portables, autoradios, lecteurs DVD mais aussi les systèmes d'aide à la navigation et régulateurs de vitesse n'en sont que quelques exemples.

Quatre grands types de distractions non exclusifs sont distinguables (Ranney, Mazzae, Garrott & Goodman, 2000 ; Young et al., 2003) :

- La **distraction visuelle** qui se définit comme une période de temps pendant laquelle le conducteur ne voit pas la route. La distraction visuelle peut prendre trois formes : lorsque le conducteur ne regarde pas la route, lorsque le champ visuel est obstrué et lorsque le conducteur regarde la route mais ne voit pas (Ito, Uno, Atsumi & Akamatsu, 2001).
- La **distraction auditive** apparaît lorsque le conducteur focalise son attention sur des sons ou signaux auditifs plutôt que sur l'environnement routier. Cette distraction est liée à l'écoute de musique ou à une discussion (téléphonique ou avec un passager).
- La **distraction physique (ou biomécanique)** apparaît lorsque le conducteur enlève au moins une main du volant pour manipuler physiquement un objet. Par exemple, lors d'une opération liée à usage de l'autoradio telle que chercher un compact disc dans la boîte à gants et l'insérer dans l'autoradio.
- Et la **distraction cognitive** rencontrée lorsque les conducteurs sont absorbés par une activité à forte demande en ressources cognitives les rendant incapables de conduire leur véhicule de manière sûre. Cette activité peut être indirectement liée à la tâche de conduite avec l'utilisation d'un système d'aide à la navigation par exemple. Toutefois, l'usage d'un tel système n'est pas nécessairement négatif pour la sécurité.

Pour ces quatre catégories, c'est plutôt la sur-abondance d'informations ou le dépassement des ressources attentionnelles disponibles qui mène à une situation dangereuse. En conséquence, toutes les distractions ne sont pas négatives en termes de sécurité par essence.

D'après Royal (2003), au cours des cinq années précédant l'étude près de 3.5% des conducteurs États-Uniens ont été impliqués dans au moins un accident causé par distraction, soit l'équivalent de 6 à 8.3 millions de conducteurs. Les conducteurs impliqués dans ces accidents étaient distraits car occupés à diverses tâches (voir tableau 4).

Tableau 4. Répartition des distractions à l'origine d'un accident. D'après Royal (2003).

Type de distraction	Pourcentage en rapport aux accidents liés à une distraction	Pourcentage en rapport à l'ensemble des conducteurs
Regard porté sur quelque chose en dehors du véhicule	23	0.8
Interagit avec les enfants ou les passagers	19	0.7
Regard porté sur quelque chose à l'intérieur du véhicule	14	0.5
Distrait par un autre conducteur	11	0.4
Plongé dans ses pensées	5	0.2
Regarde un animal en dehors du véhicule	3	0.1
Interagit avec des appareils	2	0.1
Autres distractions	23	0.8

Par la suite, seul le terme distraction sera employé. Toutefois il convient de distinguer la distraction de l'inattention. L'inattention contrairement à la distraction se caractérise par l'absence de déclencheur externe à l'instant où elle survient. Elle intervient le plus souvent lorsque la tâche de conduite apparaît au conducteur comme routinière lui laissant l'opportunité de penser à autre chose (Stutts et al., 2001). D'après Mosedale (2005), l'inattention est un facteur contributif de la survenue des accidents dans 18% des accidents mortels, 20% des accidents sévères et 25% de l'ensemble des accidents. Constituant ainsi le principal facteur contributif de la survenue des accidents et devançant la distraction qui n'interviendrait que dans 6 à 7% des cas.

I.5.4 Les solutions envisagées

Au regard de la proportion des sorties de voie dans les données issues de l'accidentologie, réduire ce type d'accident est devenu un enjeu important. Diverses mesures ont été adoptées par les pouvoirs publics. Ainsi, les campagnes de prévention et de sécurité routières visant à sensibiliser les conducteurs sur leurs mauvaises pratiques se sont multipliées (ex. : faire des pauses toutes les deux heures). La répression a été renforcée, notamment via l'utilisation de radars automatiques. La législation a également été adaptée. Par exemple, l'usage des téléphones portables (distraction physique : portable tenu en main, et cognitive : discussion) a été interdit en 2003 pour la France. La loi visant directement la distraction physique stipule que « l'usage d'un téléphone tenu en main par le conducteur d'un véhicule en circulation » est strictement interdit. La législation française se trouve être dans une situation intermédiaire, certains pays laissant l'usage du téléphone complètement libre (comme plusieurs états aux États-Unis tels l'Alabama ou la Louisiane), et d'autres au contraire se montrent encore plus fermes que la France. Au Royaume-Uni, il est ainsi interdit de

manipuler son portable en conduisant, sous peine d'une amende de 89 € et d'une perte de 3 points sur son permis de conduire.

Malgré la volonté affichée des pouvoirs publics en termes de sécurité routière, il semble évident que les interdictions légales ne peuvent pas à elles seules endiguer les phénomènes de distraction. À titre d'exemple, un conducteur sur la route des vacances pourra toujours se laisser distraire même s'il ne téléphone pas et qu'il fait des pauses régulières sur son trajet. Afin d'apporter une solution complémentaire, nous étudions l'apport de dispositifs d'assistance à la conduite. Notre intérêt se portant plus particulièrement sur la prévention des sorties de voie.

Pour **synthétiser**, il existe deux types d'erreurs humaines : les ratés et les fautes. En conduite automobile, les accidents font principalement suite à des ratés (erreurs commises dans l'action). Plus de 27% des erreurs commises en conduite mènent les conducteurs à sortir de leur voie (Najm et al., 2007). Les fautes d'attention (inattention et distraction) sont des causes majeures de l'accidentologie. Afin de lutter contre ces accidents, diverses mesures ont été prises par les pouvoirs publics (législation sur l'usage du téléphone portable, campagne de prévention...) Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à une solution complémentaire : les assistances à la conduite automobile.

II. LA COOPERATION HOMME-MACHINE

II.1 DEFINITION DU CONCEPT

II.1.1 La psychologie ergonomique

Avant de définir le concept de coopération homme-machine en psychologie, il convient de replacer cette notion dans le cadre qui l'a vu naître : celui de la « psychologie ergonomique ». Cette terminologie est une spécialité Française qui n'est pas employée dans la littérature internationale où « *Human factors* » (ex. : Karwowski, 2005) et « *cognitive ergonomics* » (ex. : Green & Hoc, 1991 pour une définition) sont préférés. En France, le terme d'« ergonomie cognitive » plus proche de la terminologie anglo-saxonne est parfois employé. L'accent est alors mis sur l'ergonomie plus que sur la psychologie. Cette discipline scientifique a comme objectif originel d'étudier et d'améliorer les conditions de travail. Par extension, la psychologie ergonomique s'intéresse aujourd'hui à l'humain dans son environnement même lorsque celui-ci n'est plus un environnement de travail au sens strict. De par ses intérêts, la psychologie ergonomique se situe à la croisée des différentes sciences en rapport à l'étude de l'humain telles que la sociologie, la linguistique, la logique, les neurosciences, la robotique, l'automatique, l'informatique... Toutefois, la discipline principale de la psychologie ergonomique reste la psychologie. Les relations entretenues entre la psychologie et

l'ergonomie sont doubles. Les connaissances et méthodes de la psychologie sont utilisées pour apporter des réponses pratiques aux problèmes d'ergonomie. De son côté, la psychologie utilise les situations de terrain comme un domaine de recherche original pour étoffer ses connaissances sur le fonctionnement de l'humain. Ainsi la psychologie ergonomique est productrice à la fois de théories (description globale d'un mode de fonctionnement et par conséquent peu adaptée à une situation précise) et d'observations (propres à une situation donnée donc précises mais peu généralisables).

La spécificité forte de l'ergonomie est qu'elle revendique une approche globale fondée sur l'humain dans son système de travail, en tenant compte des aspects physiques, cognitifs, sociaux, organisationnels, environnementaux et tout autre facteur pertinent (Chapanis, 1996 ; Grandjean, 1986 ; Karwowski 2001 ; Stanton, Hedge, Brookhuis, Salas & Hendrick, 2004 ; Vicente, 2004). L'association internationale d'ergonomie (IEA, 2008)¹ a adoptée en 2000 la définition suivante :

« L'ergonomie (ou « human factors ») est la discipline scientifique qui s'intéresse à la compréhension des interactions entre l'humain et les éléments d'un système, et la corporation qui applique les théories, principes, données et méthodes à la conception en vue d'optimiser le bien-être de l'humain et la performance du système dans son ensemble. »

Par la suite l'association internationale d'ergonomie distingue trois domaines de spécialisation au sein de la discipline : l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle. L'ergonomie cognitive (ou psychologie ergonomique) est définie comme :

« ... s'intéressant aux processus mentaux tels la perception, la mémoire, le raisonnement et les réponses motrices, dans leurs interactions entre les humains et les autres éléments du système. Les domaines d'intérêt incluent la charge mentale, la prise de décision, les performances motrices, les interactions homme-ordinateur, la fiabilité humaine... »

Cette définition de l'ergonomie met en avant les usages des connaissances et méthodologies faites par l'ergonomie afin d'optimiser une situation. La réciproque (utilisation des situations de terrain pour des productions plus théoriques) n'est pas contenue dans la définition et incombe aux chercheurs en psychologie ergonomique.

II.1.2 Les relations homme-machine

Dans la définition de l'ergonomie cognitive, l'IEA (2008) fait état des « interactions homme-ordinateur » comme l'un des domaines d'intérêt de la discipline. Les premières études dans

¹ De l'anglais « International Ergonomics Association », association internationale d'ergonomie.

ce domaine portaient sur des systèmes (homme-machine) où toute l'intelligence reposait sur l'utilisateur, comme pour l'édition de texte par exemple. Lorsque les machines ont été dotées de capacités de communication plus développées, la terminologie de « communication homme-machine » a été instaurée. Les travaux portaient alors sur les moyens de communication entre l'individu et la machine, ne prenant pas en considération les contenus et objectifs de la communication (Hoc, 1999). Dans un dernier temps, le concept de « coopération homme-machine » a été évoqué. Initialement, le concept de coopération homme-machine a été introduit dans le contexte de l'automatique humaine (cf. Millot, 1988). Bien que l'automatique de la supervision ait été sensible à cette question depuis plusieurs années, le premier livre de psychologie mentionnant clairement cette notion de coopération homme-machine n'était édité qu'en 1995 par Hoc, Cacciabue et Hollnagel. Plus tard, Hoc (1999, 2000, 2001a) s'est appuyé sur les travaux de Piaget (1977) pour proposer une définition de la coopération homme-machine. Dans un premier temps, deux niveaux de l'activité coopérative sont distingués : opérer et coopérer. Ainsi Piaget (1977, p. 91) précise :

« Coopérer dans l'action, c'est opérer en commun, c'est-à-dire ajuster au moyen de nouvelles opérations... les opérations exécutées par chacun des partenaires... c'est coordonner les opérations de chaque partenaire en un seul système opératoire dont les actes mêmes de collaboration constituent les opérations intégrant »

La coopération a donc été abordée d'un point de vue fonctionnel, correspondant aux activités coopératives n'apparaissant pas lors d'une activité individuelle mais au contraire, réalisées uniquement en présence d'une équipe. Deux agents entrent en coopération lorsqu'au minimum deux conditions sont réunies (Hoc, 1996, 2000 et 2001a) :

- Chacun des agents s'efforce d'atteindre ses propres objectifs et ce faisant il peut entrer en **interférence** avec les objectifs, ressources et procédures de l'autre agent. L'interférence peut prendre plusieurs formes. Ainsi Hoc (2001a), définit quatre types d'interférences. L'interférence de pré-condition intervient lorsque l'activité d'un agent est un préalable à l'activité de l'autre agent. Une interférence dite d'interaction est définie comme une possible interférence mutuelle engendrée par les activités respectives des deux agents. Le troisième type d'interférence est le contrôle mutuel. Dans ce cas, tandis qu'un agent réalise effectivement une tâche, l'autre agent simule la même tâche en arrière plan. L'activité du deuxième agent vise à vérifier les actions du premier. Le quatrième type d'interférence a été nommé de redondance. Dans ce dernier cas de figure, une tâche donnée ne peut pas être attribuée à l'avance à l'un ou l'autre des deux agents en raison du caractère hautement dynamique de la situation considérée. En conséquence, l'agent le mieux placé au moment requis (d'un point de vue spatial, ressources disponibles...) pour réaliser la tâche, s'en chargera.

— Chacun des agents essaie de gérer l'interférence de sorte à **faciliter** les activités individuelles et/ou les tâches en commun si elles existent. La nature (positive ou négative) de l'interférence n'est pas liée au type d'interférence mais à son caractère facilitateur ou non. L'interférence est positive lorsqu'elle permet une amélioration des performances individuelles ou de l'équipe. Si au contraire, l'interférence est considérée comme une gêne dans le déroulement normal de l'activité individuelle, elle est négative. Certains auteurs vont même parler d'activités compétitives dans ce cadre (Vanderhaegen, Chalmé, Anceaux & Millot, 2006). Ainsi, en se basant sur la définition de la coopération de Castelfranchi (1998), Vanderhaegen et al. (2006, p.184) proposent une définition de la compétition entre agents lorsque ces derniers :

« [...] poursuivent des objectifs interférents mutuellement et que chacun des agents contrôle ces interférences de manière à faciliter ses propres activités ou faire commettre des erreurs à l'autre. »

Le caractère symétrique de la définition de la coopération proposée par Hoc n'est pas nécessairement, selon ces auteurs, pleinement satisfait. Ainsi, même dans le cadre de la coopération homme-homme, un seul agent peut être amené à générer l'interférence à lui seul (Hoc, 2000). Dans le cadre de la coopération homme-machine, il apparaît clairement du fait des capacités coopératives limitées de la machine, que la relation va être dissymétrique. Dans l'équipe homme-machine, c'est l'agent humain qui est le responsable de la coopération.

II.1.3 Les niveaux de coopération homme-machine

Selon Hoc (2000, 2001a), les activités coopératives peuvent être organisées en trois niveaux (Figure 8). Dans l'ordre où ils seront présentés, ces trois niveaux impliquent des coûts temporels croissants et des traitements reposant sur des informations de plus en plus abstraites.

La **coopération dans l'action** regroupe les activités coopératives prenant place au niveau opérationnel. Cette catégorie inclut la création d'interférences locales, la détection d'interférences locales, la résolution d'interférences locales et l'identification d'objectifs sur la base de connaissances antérieures du domaine d'activité. La création d'interférences locales correspond à la volonté délibérée d'un agent d'interférer avec l'autre agent, dans le but de faciliter soit sa propre activité, soit celle de l'autre agent ou encore celle liée à une tâche commune. La création involontaire d'interférences n'est pas considérée comme une activité coopérative, mais comme une propriété collatérale d'une action individuelle. La capacité des agents à détecter une interférence locale est un préalable à l'activité coopérative en elle-même ; la détection d'une volonté coopérative a lieu à ce niveau de coopération. Une fois détectée ou créée, l'interférence peut être résolue ; cette résolution peut prendre effet au

niveau de l'action. Finalement, l'identification des objectifs de l'autre agent, sur la base d'une connaissance préalable de l'activité, permet une détection et une résolution de l'interférence par anticipation (Castelfranchi, 1998).

La **coopération dans la planification** consiste essentiellement en l'élaboration et le maintien d'un référentiel commun (notion introduite par de Terssac et Chabaud, 1990). En effet, de manière à pouvoir communiquer entre eux, les agents ont besoin de partager un minimum de contexte commun, notamment une représentation commune de l'environnement (Salas, Prince, Baker & Shrestha, 1995) et de l'équipe considérée comme une ressource (Hoc, 2000). Par conséquent, l'élaboration et le maintien d'un référentiel commun peut inclure un but et un plan commun, la répartition des rôles dans l'équipe et une représentation partagée de l'environnement.

La **méta-coopération** correspond au niveau d'abstraction le plus élevé. Il permet aux agents d'améliorer leurs activités coopératives (prenant place aux autres niveaux) en élaborant ou en maintenant à jour un code de communication commun, des représentations compatibles et un modèle de soi-même et de son partenaire. La méta-coopération renvoie à des activités métacognitives, à savoir des activités cognitives portant sur les activités cognitives elles-mêmes (Flavell, 1979).

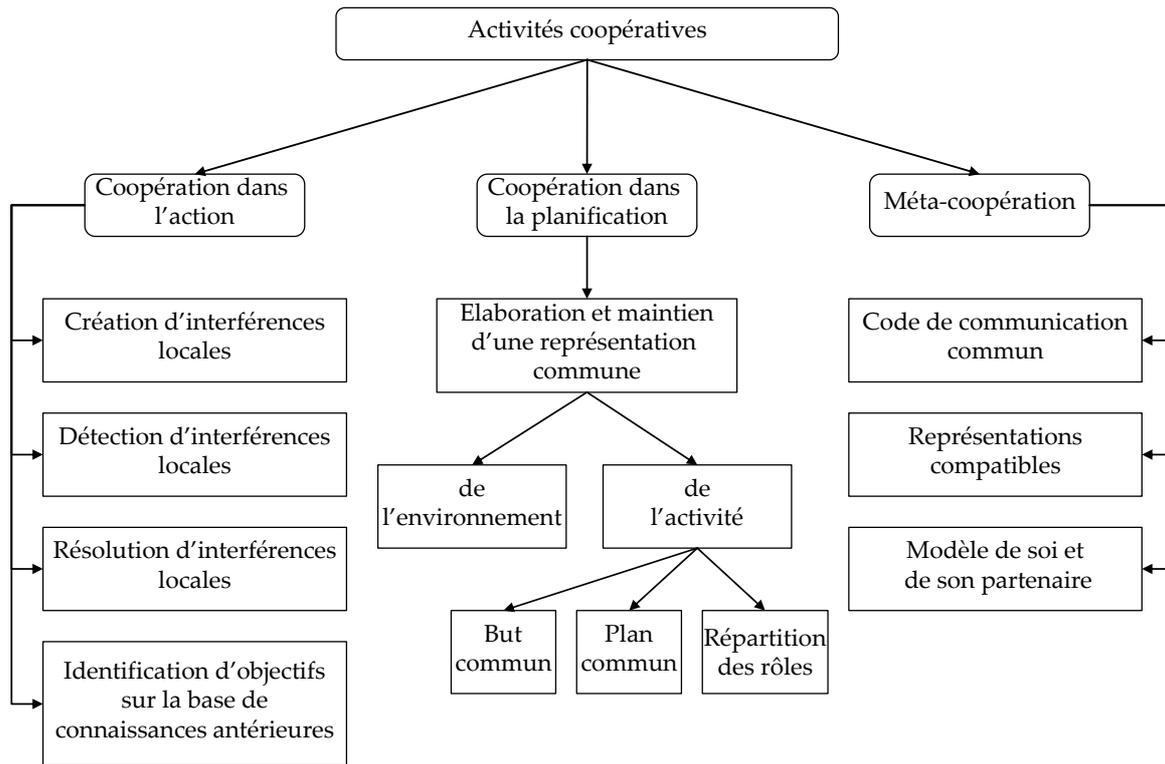


Figure 8. Les activités coopératives d'après Hoc (2001a).

Pour **synthétiser**, la psychologie ergonomique est une discipline qui s'intéresse aux individus dans les interactions qu'ils entretiennent avec leur environnement. La coopération homme-machine s'inscrit dans ce cadre et intervient lorsque homme et machine interfèrent dans la réalisation de leurs objectifs, en cherchant à faciliter les activités individuelles ou collectives, si elles existent. Hoc (2000, 2001a) distingue trois niveaux de coopération : la coopération dans l'action, la coopération dans la planification et la méta-coopération.

II.2 CATEGORISATIONS EXISTANTES

Dans le cadre de la coopération homme-machine les différents dispositifs automatiques proposant des modes d'interactions variés impliquent différents types de coopération. La coopération homme-machine appliquée à la conduite automobile ne fait pas exception (Villarme, 2004). Avant de détailler une catégorisation spécifique aux assistances à la conduite proposée par Hoc, Young et Blosseville (sous presse), la classification de Sheridan et Verplank (1978) sera présentée.

II.2.1 Les dix niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplank

Le Tableau 5 reprend la classification proposée par Sheridan et Verplank (1978), originellement établie dans le contexte de la télé-opération sous-marine. Cette classification présente dix niveaux de répartition des rôles entre l'homme et la machine (ici nommée ordinateur) pour une tâche donnée. La répartition des fonctions entre l'homme et la machine est basée sur le choix des différentes options, puis de l'action à réaliser. Le modèle cherche donc à définir qui, de l'homme ou de la machine, décide des alternatives et de l'action à effectuer. Toutefois, cette classification ne permet pas de décrire comment homme et machine se partagent les tâches à effectuer. La description est centrée sur les activités de la machine, les dix catégories ont donc été définies uniquement sur la base de ce que la machine fait ou ne fait pas. Les activités coopératives ne sont donc pas abordées directement mais au travers des actions de la machine. La classification suivante de Hoc, Young et Blosseville (sous presse) cherche au contraire à modéliser les formes d'interférences, appelées modes de coopération, entre homme et machine.

Tableau 5. Les 10 niveaux d'automatisation. D'après Sheridan & Verplank (1978).

Niveau d'automatisation	Description des activités de l'automate
1	L'ordinateur n'offre aucune assistance : l'individu doit tout faire.
2	L'ordinateur offre un ensemble complet de solutions alternatives, ou
3	restreint le nombre d'alternatives, ou
4	en suggère une, et
5	exécute cette suggestion si l'individu l'approuve, ou
6	offre à l'individu un droit de veto, dans une période de temps restreinte, avant l'exécution automatique, ou
7	exécute l'action automatiquement puis en informe l'individu, et
8	n'informe l'individu que sur demande, ou
9	informe l'individu uniquement si l'ordinateur lui-même le décide.
10	L'ordinateur décide de tout et agit de manière autonome en ignorant l'individu.

II.2.2 Niveaux et modes de coopération en conduite automobile

Ainsi, et sur la base du modèle de Hoc (2000, 2001a) présenté dans la section précédente, Hoc et Blosseville (2003) et Hoc, Young et Blosseville (sous presse) proposent un cadre théorique pour la coopération homme-machine en conduite automobile. Ce cadre théorique repose sur quatre présupposés. Premièrement, le développement récent des nouvelles technologies dans le domaine de l'automatisation des véhicules autorise à y parler de coopération homme-machine. En effet, sont aujourd'hui disponibles les technologies nécessaires à l'élaboration d'assistances coopératives entre les dites technologies et les conducteurs. Deuxièmement, les assistances à la conduite sont envisagées comme des aides et non comme une substitution aux conducteurs. Troisièmement, ce cadre théorique se distingue nettement de celui de Sheridan et Verplank (1978), en se basant non plus sur la division des tâches à effectuer entre homme et machine, mais sur les modifications qu'impliquent les activités coopératives sur l'activité humaine. Enfin, et au contraire du modèle de Sheridan et Verplank (1978), le modèle de Hoc, Young et Blosseville (sous presse) présente une catégorisation des assistances se basant sur l'activité humaine en situation de coopération homme-machine. Ainsi, l'aide apportée aux conducteurs est dépendante d'une bonne coopération homme-machine.

- **Les niveaux de coopération**

Les trois niveaux de coopération (méta-coopération, coopération dans la planification et coopération dans l'action) décrits par Hoc (2001a) ont été adaptés au domaine de la conduite automobile.

La **coopération dans l'action** renvoie à la gestion des interférences à court terme, sans anticipation ou presque, sur les objectifs poursuivis par l'autre agent. Les quatre types d'interactions décrits précédemment peuvent prendre place à ce niveau. Par exemple, c'est une interférence de type contrôle mutuel qui est mise en jeu avec une assistance fournissant un avertissement. Dans ce cas, l'assistance (« machine » de l'équipe homme-machine) agit comme un agent contrôlant les activités de l'autre agent et délivrant une évaluation sur ces agissements. Dans le cas d'un avertissement, cette évaluation prend la forme d'une critique. Elle peut aussi prendre la forme d'un conseil lorsque l'assistance se veut anticipative. L'expérience acquise lors d'études portant sur les pilotes d'avion a amené à recommander l'interférence de type contrôle mutuel, et ce de par l'impossibilité d'anticiper l'ensemble des erreurs résultant de la complexité des interactions entre l'agent, la machine et le contexte (Wiener, Kanki & Helmreich, 1993). La grande majorité des assistances visant à l'amélioration de la sécurité lors de situations critiques interviennent à ce niveau de coopération.

L'introduction d'assistances entraîne des modifications dans les comportements des conducteurs. Il est souhaitable que ces modifications améliorent leurs comportements. Parfois cependant, l'introduction d'assistances engendre des effets aussi bien indésirables qu'inattendus sur les comportements des individus (Parasuraman & Riley, 1997). Dans le contexte des transports routiers, ces effets ont été qualifiés d'**adaptations comportementales** (OECD, 1990, Rudin-Brown & Noy, 2002 ; Rudin-Brown & Parker, 2004). Ces adaptations comportementales comprennent l'ensemble des modifications de comportements faisant suite à un changement dans le système conducteur-véhicule-environnement, comme par exemple l'introduction d'une assistance. Ces adaptations peuvent donc aussi bien aller dans le sens d'une amélioration comme dans celui d'une dégradation des performances de l'individu. Une théorie qualitative des adaptations comportementales, apparaissant suite à l'introduction d'une assistance à la conduite, autorise à des prédictions sur la nature et la sévérité des dites adaptations comportementales (Brown, 2000 et Rudin-Brown & Noy, 2002 ; voir figure 9). Ce modèle repose sur le modèle mental que se fait chaque individu de l'activité de conduite. Deux caractéristiques principales de sa personnalité sont prises en considération. L'attribution causale que chaque individu fait des événements (dans le cas présent, émanant de la situation de coopération homme-machine). Les individus présentant majoritairement des attributions causales externes auraient ainsi une plus grande facilité à céder le contrôle à une assistance que les individus favorisant des attributions causales internes. Par conséquent, ils pourraient se reposer, voire devenir trop confiants vis-à-vis de l'assistance, ce qui amènerait à un moindre investissement dans l'activité de conduite, ralentissant, voire même inhibant leurs réactions, en cas de défaillance de l'assistance. La deuxième composante de la personnalité utilisée est la propension du conducteur à rechercher des sensations. Ainsi, les individus à la recherche de sensations seraient plus sensibles aux adaptations comportementales dans la mesure où l'assistance serait perçue comme diminuant le niveau de risque (Burns & Wilde, 1995).

Ce modèle qualitatif des adaptations comportementales inclut également une dépendance du modèle mental de l'activité de conduite à la confiance placée par les conducteurs dans l'assistance. La confiance placée dans la « machine » est un facteur explicatif de l'utilisation et de la dépendance vis-à-vis d'une grande variété de dispositifs automatiques (ex. : Sheridan, 1980 ; Sheridan & Hennessy, 1984). D'après Muir (1994), les individus interviennent dans une situation ou reprennent le contrôle manuel d'une tâche lorsque leur niveau de confiance dans l'assistance passe en deçà d'un certain seuil. Si au contraire, les conducteurs ont placé un niveau de confiance dans l'assistance suffisamment important, il est possible qu'ils se contentent de l'assistance et éprouvent des difficultés à intervenir lors d'une défaillance. Ce phénomène est connu sous le nom de contentement (Parasuraman, 2000).

Le modèle mental du conducteur, alimenté par certaines caractéristiques de sa personnalité et de la confiance placée dans la(es) machine(s) avec lesquelles il doit coopérer, influencent l'activité de conduite dans son ensemble (cf. les trois niveaux de contrôle définis par Michon (1985), cadre général, partie I.1). Les feedbacks reçus du véhicule, de la route et de l'environnement affectent la confiance du conducteur, aussi bien directement (avec l'expérience) qu'indirectement (informations reçues par les médias, d'autres personnes, ou via des campagnes de prévention routière).

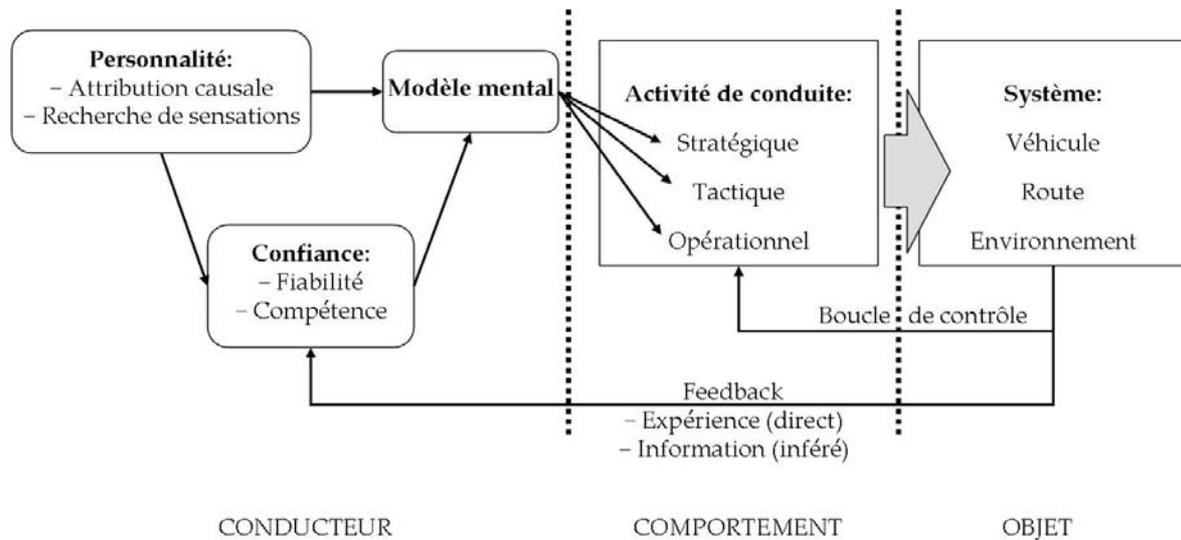


Figure 9. Modèle qualitatif des adaptations comportementales.

D'après Rudin-Brown et Noy (2002).

Selon Hoc et al. (sous presse), deux types d'adaptations comportementales peuvent se développer au niveau de la coopération dans l'action : le contournement de l'assistance et le phénomène de contentement.

Un effet de **contournement de l'assistance** faisant suite à l'introduction d'un régulateur de vitesse et d'inter-distance (ACC) a été observé (sur simulateur de conduite : Nilsson, 1995 ; et en conditions de conduite réelle : Saad & Villame, 1999). Ces deux études montrent que les conducteurs passent plus de temps sur la voie de gauche en présence de l'assistance qu'en son absence. Ce comportement vise à réduire l'interférence homme-machine perçue comme négative par les conducteurs. Cette perception négative du dispositif est liée à la réduction de la vitesse du véhicule commandée par l'assistance au moment d'un dépassement à réaliser, réduction de vitesse elle-même liée au rapprochement entre le véhicule conduit et le véhicule à dépasser. En conséquence, les conducteurs préfèrent anticiper leur manœuvre de dépassement et passer plus de temps sur la voie de gauche (dans le cas où aucun véhicule ne s'y trouve) afin de maintenir une vitesse stable.

Le **phénomène de contentement** a déjà été observé dans le domaine de l'aviation (Moray, 2003 ; Parasuraman, Molloy, & Singh, 1993). Même s'il n'y a pas de consensus sur la définition du terme, le phénomène de contentement est décrit par Wiener (1981, (p. 117) comme :

« Un état psychologique caractérisé par un faible taux de suspicion. »

Le contentement est observable pratiquement par l'incapacité des opérateurs à répondre efficacement, suite à un fonctionnement défectueux d'une assistance (Parasuraman et al., 1993). Par exemple, lorsqu'une assistance sort de son domaine de validité et que l'opérateur n'est pas capable de reprendre en main efficacement la situation, le phénomène de contentement peut en être à l'origine.

Trois manifestations non exclusives du contentement sont distinguables : la négligence des informations nécessaires à la réalisation de la fonction déléguée, la déficience de supervision de cette fonction, la déficience de correction des résultats (Hoc et al., sous presse). Appliqué au domaine de la conduite automobile, les conducteurs dont une partie de l'activité de conduite a été déléguée à une assistance, pourraient négliger les informations visuelles habituellement utiles à la réalisation de la fonction. Ils pourraient aussi présenter des défauts de supervision ou de correction de cette fonction. Dans le domaine des assistances à la conduite, Ward, Fairclough et Humphreys (1995) sont les premiers auteurs à notre connaissance, à rapporter un phénomène de contentement suite à l'utilisation de l'ACC. Stanton et al. (2001) en font également état. Lors de leur expérience, menée sur simulateur de conduite, les conducteurs avaient pour consigne de rattraper un véhicule, puis de le suivre à une distance « confortable ». Cette procédure expérimentale d'une durée d'environ 10 minutes était répétée dans quatre conditions expérimentales : sans assistance, avec l'ACC, avec une assistance gérant la position latérale du véhicule en autonomie (régulateur de position latérale : RPL) et avec la combinaison des deux types d'assistance. Dans chaque condition expérimentale, le véhicule suivi freinait brutalement une fois. Les participants n'étaient pas informés de cet événement, ni de l'endroit de sa survenue. Les résultats montrent un nombre de collisions arrières avec le véhicule suivi, lorsque ce dernier freine brutalement, plus important en condition avec assistance. En rapport à la condition sans assistance, le nombre de collisions est doublé avec le RPL et quadruplé avec l'ACC et la combinaison ACC plus RPL. Ces effets sont observés alors qu'il n'y a pas de différence significative entre conditions pour la vitesse comme pour le temps de pré-contact séparant le véhicule conduit du véhicule suivi. Dans l'ensemble, l'assistance a introduit des difficultés d'évitement. Ce type de résultats peut trouver une source d'explication dans le phénomène de contentement.

La **coopération dans la planification** consiste essentiellement en l'élaboration et le maintien d'un référentiel commun entre les deux agents de l'équipe homme-machine. Ce référentiel commun comprend notamment une représentation commune de l'état de l'environnement dans un format adapté à chacun des agents. La présentation de l'information n'est toutefois pas nécessairement commune aux deux agents et peut au contraire être adaptée aux tâches de chacun. Une assistance à la conduite automobile - pour fonctionner normalement - peut nécessiter des valeurs d'accélération latérale ou d'un coefficient d'adhésion au sol, tandis que les conducteurs préféreront une traduction de ces valeurs en termes de sensations. Le référentiel commun n'inclut pas uniquement une représentation commune de l'environnement, il fait également état des activités de l'équipe, à savoir les plans et objectifs communs à l'équipe homme-machine, la répartition des fonctions au sein de l'équipe... Ce référentiel commun est alimenté par une communication entre agents. Les activités et statuts de la machine sont notifiés au conducteur et les intentions du conducteur parviennent à la machine via les actions qu'il entreprend. Ce niveau de coopération n'a pas encore fait l'objet de l'attention des chercheurs dans le contexte de la conduite automobile. Toutefois, c'est très probablement une voie de recherche qu'il conviendra d'explorer dans le futur. Par exemple, la communication de l'assistance vers le conducteur requiert probablement d'être opérée de manière plus directe qu'au moyen d'un avertissement ; ce dernier constituant une information symbolique par définition peu compatible avec une intervention au niveau de l'action (subsymbolique). Une solution dans ce sens pourrait être de délivrer des avertissements via des interfaces dites écologiques (Vicente, 2002). L'objectif de ces interfaces est de rendre la perception des avertissements plus évidente au conducteur, de manière à améliorer ses performances et à libérer des ressources attentionnelles symboliques. Dans ce cas, le référentiel commun serait toujours élaboré et maintenu à jour au niveau de la planification. Sa mise à jour serait simplement facilitée par un meilleur accès aux éléments relatifs à l'action, qui alimentent en continu le niveau de coopération dans la planification.

La **méta-coopération** est un niveau de coopération qui permet de faciliter la coopération aux deux niveaux précédents, et ce par l'utilisation de modèles de soi-même, de l'autre agent ou de l'interaction entre les deux agents. C'est à ce niveau qu'est ajustée la confiance placée dans l'assistance en relation avec la confiance en soi (Lee & See, 2004 ; Muir, 1994). Le modèle de l'interaction entre le conducteur et l'assistance joue également un rôle important dans le développement de la confiance dans le système (Rajaonah, Anceaux, Espié & Hoc, 2003). Un modèle imprécis de la machine peut engendrer un phénomène dit de sur-généralisation. Le conducteur attribue alors à l'assistance des fonctions qu'elle n'est pas en mesure de réaliser. Avec un régulateur de vitesse et d'inter-distance, le nombre de collisions arrières lors d'un freinage brusque du véhicule suivi, augmente (Stanton et al., 2001 ; Stanton & Young, 1998), car les conducteurs se sont représentés l'assistance comme étant également un système anticollisions. L'ABS est un autre exemple pointant l'importance d'un modèle de l'assistance

adapté. L'efficacité de l'ABS a été observée en termes de réduction d'accidents pour les jeunes conducteurs mais pas pour les conducteurs âgés (Broughton & Baugham, 2002). Les conducteurs âgés continueraient de freiner de manière intermittente pour éviter que le véhicule ne se mette à déraper. Or cette activité est le propre de l'ABS. De par le comportement des conducteurs âgés, l'avantage sécuritaire de l'assistance est annihilé. L'objectif d'une aide opérant à ce niveau de coopération est de faciliter l'élaboration simple et pertinente d'un modèle de fonctionnement de l'assistance.

- **Les modes de coopération**

Par ailleurs, Hoc et al. (sous presse) ont élaboré une catégorisation par modes de coopération prenant en compte les activités coopératives en plus des niveaux d'automatisation. Quatre modes de coopération, ordonnés selon le degré d'intervention de l'assistance sur le contrôle du véhicule, ont ainsi été définis.

Avec le **mode perceptif**, l'assistance fournit un complément d'information aux conducteurs afin d'améliorer leur perception de l'environnement et, éventuellement, leur conscience de la situation. Rendre ce mode de coopération efficace implique de déterminer quelles informations pertinentes sont à fournir aux conducteurs et sous quelle forme. Cette aide serait fournie soit de manière continue ou serait déclenchée automatiquement sur la base de certains critères (ex. : une aide à la conduite de nuit se déclenche dans l'obscurité). Par ailleurs, l'information perceptive transmise au moyen de l'assistance peut aussi bien être de nature symbolique que de nature subsymbolique. Le recours au compteur de vitesse illustre un usage courant d'une information de nature symbolique afin d'améliorer la perception qu'ont les conducteurs de leur propre vitesse de déplacement. Le traitement associé aux informations symboliques est gourmand en temps et en ressources attentionnelles symboliques. Au contraire, fournir des informations s'insérant directement dans les boucles de régulations sensori-motrices, permettrait d'influencer les actions des conducteurs dans des délais réduits. Un enjeu prioritaire est donc de déterminer la modalité sensorielle à mobiliser pour favoriser les réponses motrices des conducteurs.

Pour illustrer d'un exemple commun une assistance de type mode perceptif ayant recours soit à l'utilisation d'informations symboliques, soit subsymboliques ; nous avons choisi une assistance visant à adapter la vitesse d'approche en virage. À l'approche d'un virage en conditions de visibilité dégradée, un conseil sur la vitesse à adopter peut être adressé aux conducteurs (ex. : LeBlanc et al., 2006). Mais une solution alternative est de fournir une information de nature subsymbolique. Par exemple, Ward et al. (2004) utilisent un dispositif permettant de restituer une partie de l'information visuelle pertinente (distance séparant le véhicule de l'entrée en virage) pour le choix de la vitesse d'approche d'un virage.

Avec le **mode contrôle mutuel**, l'assistance est conçue pour intervenir lorsque les conducteurs dépassent des limites prédéfinies en termes de risque (de dépassement de vitesse ou de sortie de voie, par exemple). L'intervention de l'assistance consiste soit en une simple critique du comportement du conducteur, soit en une critique transmise via une action sur la direction du véhicule et donc sur sa trajectoire. Quatre modes de type contrôle mutuel impliquant un degré d'intrusion croissant ont été distingués :

- **Mode avertissement** : Sur la base de l'estimation anticipée d'un risque, l'assistance émet une critique sur le comportement du conducteur. Là où les modalités sensorielles mobilisées pour transmettre l'avertissement peuvent en affecter son efficacité. Concernant cette question, la modalité haptique semble être une bonne alternative aux modalités visuelles et auditives déjà largement sollicitées par l'activité de conduite non assistée. Une autre problématique d'importance concerne les conditions de déclenchement de l'assistance (ex. : Lee, Mc Gehee, Brown & Reyes, 2002). Les limites prédéfinies à l'origine du déclenchement d'un avertissement doivent être compatibles avec l'estimation du risque du conducteur. En effet, les deux agents de l'équipe homme-machine doivent partager un référentiel commun, essentiellement en termes de risques perçus et du moment de déclenchement de l'avertissement. A défaut d'avoir un référentiel commun, les avertissements pourraient être perçus par les conducteurs soit comme trop nombreux (fausses alarmes), soit comme pas assez nombreux (alarmes manquées).
- **Mode suggestion d'action** : Très proche du mode avertissement, ce mode n'intervient pas directement sur le contrôle de la trajectoire du véhicule. Toutefois, l'information fournie aux conducteurs, est plus qu'une simple critique sur leur comportement. En plus d'avertir les conducteurs le mode suggestion d'action va les inciter à entreprendre une action donnée en agissant directement sur l'actionneur spécifique de l'action à entreprendre. Par exemple, une vibration sur la pédale d'accélérateur déclenchée sur la base d'un dépassement de la limite de vitesse autorisée (ex. : Gouin, Cherrier & Touvenot, 2003). La vibration de la pédale d'accélérateur est à la fois un avertissement (critique du comportement du conducteur) et une incitation à lever le pied de l'accélérateur, de par sa localisation sur l'actionneur en charge de la régulation de la vitesse.

- **Mode limitatif** : Ce mode vise à inciter les conducteurs à ne pas réaliser certaines actions. Contrairement au mode suggestion d'action, cette incitation tend à réduire les possibilités d'action des conducteurs. Dans le prolongement de l'exemple du contrôle longitudinal développé précédemment lorsque les conducteurs approchent la limite de vitesse autorisée, la pédale d'accélérateur se rigidifie de manière à restreindre la possibilité d'accélérer. Une simple pression supplémentaire sur la pédale désactive l'assistance ; la pédale offre alors une résistance classique. Cette assistance s'est montrée efficace pour réduire la vitesse des conducteurs (Várehlyi, Hjalmdahl, Hydén & Draskóczy, 2004). L'intervention active du dispositif dans l'activité de guidage du véhicule apparaît véritablement avec ce mode de coopération.
- **Mode correctif** : Ce mode de coopération participe très clairement à l'activité de guidage. Les études portant sur ce mode de coopération en sont encore au stade de l'élaboration de prototypes. Le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur) a par exemple développé une assistance au contrôle latéral ramenant le véhicule sur une trajectoire sûre lorsque le conducteur se trouve être proche de la sortie de voie. Le conducteur perd donc de façon transitoire le contrôle du véhicule. Il est donc crucial que l'action du dispositif s'insère efficacement dans les boucles de contrôles sensori-motrices du conducteur, afin de ne pas provoquer de réactions inadaptées et d'assurer une bonne reprise en main.

Avec le mode **délégation de fonction**, le conducteur choisit de confier durablement une partie de l'activité de conduite à l'assistance. Deux sous-catégories de délégation de fonction ont été distinguées :

- **Mode médiatisé** : Les actions des conducteurs sur les commandes du véhicule ne sont pas directement utilisées pour le guidage du véhicule. C'est l'assistance qui agit comme un médiateur entre les actions du conducteur et la commande effective du véhicule. L'ABS est une bonne illustration du mode médiatisé. Lorsque les conducteurs effectuent un freinage d'urgence, ils pressent la pédale de frein et l'ABS régule la force du freinage (de manière à éviter que le véhicule ne se mette à déraper). C'est bien l'assistance qui gère l'activité de freinage et non pas le conducteur.

- **Mode régulé** : La gestion d'une tâche de conduite est déléguée durablement à l'assistance. Toutefois, les conducteurs choisissent de mettre en marche ou d'arrêter l'assistance quand bon leur semble. Le régulateur de vitesse et d'inter-distance est l'exemple caractéristique de ce mode d'assistance. Après avoir défini une vitesse de croisière et un temps séparant le véhicule conduit du véhicule précédent, le conducteur laisse l'assistance réguler la position longitudinale en autonomie. Ainsi, l'assistance est capable de maintenir une vitesse donnée, mais aussi de réduire ou d'augmenter cette vitesse en fonction du trafic. Le positionnement longitudinal du véhicule est alors géré efficacement. Néanmoins l'introduction de cette assistance peut entraîner certains effets néfastes tels que des difficultés de reprise en main lorsque l'assistance est mise en situation d'invalidité (Stanton et al., 2001 ; Young & Stanton, 2007).

Avec le mode **complètement automatisé** l'assistance gère complètement les activités de guidage du véhicule (contrôle latéral et contrôle longitudinal). Les auteurs envisagent deux cas de figure où un recours à ce mode d'assistance peut être nécessaire. Lorsque le conducteur est incapable de guider son véhicule (freinage d'urgence sans action de la part des conducteurs) et lorsque les risques sont très élevés (contrôle latéral dans les tunnels). Le risque principal associé à ce mode de coopération est que le conducteur se retrouve « hors de la boucle » (Kaber & Endsley, 1997), rendant un retour en contrôle manuel difficile.

Les différents modes d'assistance présentés se distinguent de par le moment de leur intervention dans l'activité de conduite. Les modes perceptif, délégation de fonction et complètement automatisé sont actifs en continu dans l'activité de conduite. En revanche, les autres modes agissent de manière transitoire. Le mode avertissement, puisqu'il a pour fonction d'améliorer le diagnostic de la situation par le conducteur, va intervenir avant l'arrivée du danger considéré. Le mode suggestion d'action intervient également en amont de l'apparition de la situation critique. Les modes limitatifs et correctifs peuvent être envisagés comme intervenant immédiatement avant ou après l'apparition de la situation critique, respectivement pour prévenir ou pour éviter l'aggravation d'une situation devenue dangereuse. Le tableau 6 propose un croisement des niveaux et des modes de coopération ainsi qu'une illustration systématique pour une assistance aux sorties de voies. Par ailleurs, différents niveaux et/ou modes de coopération décrits peuvent être requis au même moment pour l'exécution parallèle de plusieurs tâches liées à l'activité de conduite automobile.

Tableau 6. Croisement des niveaux et des modes de coopérations. Illustration par une assistance aux sorties de voie du point de vue de la machine. D'après Hoc, Young et Blosseville (sous presse).

	Méta-coopération	Coopération dans la planification	Coopération dans l'action
Mode perceptif	Modèle des capacités perceptives du conducteur (ex. : limitation des capacités visuelles)	Compensation des limitations visuelles des conducteurs (ex. : avertissement pour angle mort)	Amélioration de la perception visuelle avec des dispositifs tête haute (ex. : mise en évidence d'informations perceptives sur la courbure de la route)
Mode contrôle mutuel (Mode avertissement, mode suggestion d'action et mode limitatif)	Efficacité de la modalité sensorielle utilisée pour provoquer une réponse adaptée (ex. : auditif, tactile, haptique)	Connaissance des intentions du conducteur (ex. : dépassement et non sortie de voie involontaire : avertissement uniquement si le clignotant n'est pas actionné)	Fournir une information appropriée aux circonstances (ex. : alerte sonore, amorçage moteur au volant, résistance du volant)
Mode délégation de fonction (mode médiatisé et mode régulé)	Modèles des comportements du conducteur et de son fonctionnement mental (privilégier les actions du conducteur et contrôler la fonction si nécessaire)	Délégation d'activités à l'automate (feed-back sur le mode de l'automate et acceptation des consignes données par le conducteur)	Exécution des requêtes du conducteur (assistance au maintien dans la voie et régulateur de position automatique)
Mode complètement automatisé	Modèle de la charge de travail du conducteur et des exigences de la tâche	Accord sur les critères de l'affectation dynamique de fonction	Système anticollision latérale adaptatif

Pour **synthétiser**, les dix niveaux d'automatisation décrits par Sheridan et Verplanck (1978) ont été abordés. Le cadre de la coopération homme-machine appliqué au domaine de la conduite automobile a ensuite été développé (Hoc et al., sous presse). Les trois niveaux de la coopération homme-machine ainsi que les principaux enjeux associés ont été détaillés. Ces auteurs distinguent également quatre grands modes de coopérations : mode perceptif, contrôle mutuel, délégation de fonction et complètement automatisé. Finalement le tableau 6 propose un croisement illustré entre les niveaux et les modes de coopération.

II.3 CATEGORISATION ADOPTÉE

La catégorisation par modes adoptée dans le cadre de cette thèse est très proche de celle élaborée par Hoc et al. (sous presse) et qui vient d'être présentée. Certaines modifications liées non seulement à la prise en considération d'une nouvelle distinction entre assistances et à l'application de ce cadre au contrôle latéral, ont toutefois été apportées.

Dans un premier temps une distinction supplémentaire a été adoptée pour décrire plus finement les activités coopératives entretenues entre conducteurs et assistances. Il s'agit de la distinction entre l'automatisation du véhicule et l'automatisation de l'activité de conduite introduite par Young, Stanton et Harris (2007). Les assistances classées comme faisant partie de l'**automatisation du véhicule** interviennent dans les activités de contrôle du véhicule de bas niveau et entrent très faiblement en interférence avec les conducteurs. Ainsi, l'interférence avec les conducteurs se borne à la mise en service ou non de l'assistance. Dès lors que les conducteurs ont mis l'assistance en service, cette dernière agit au cours du déroulement de l'action et les conducteurs n'ont pas la possibilité d'en éviter l'usage. L'ABS et la boîte de vitesse automatique sont deux bons exemples d'automatisation du véhicule. Lors d'un freinage avec ABS, l'assistance optimise le freinage en évitant qu'une ou plusieurs roues du véhicule ne se bloquent. La boîte de vitesse automatique adapte le rapport en fonction de plusieurs variables incluant la vitesse du véhicule, celle de rotation du moteur, de l'enfoncement de la pédale de l'accélérateur, etc. Du point de vue des conducteurs, ces assistances font partie des caractéristiques du véhicule. Ils ne peuvent pas passer outre leur utilisation (excepté, et dans certains cas seulement, la mise en service ou non de l'assistance) et doivent se contenter d'en exploiter au mieux les possibilités. Lors de l'apparition de l'ABS, un bouton poussoir était présent de manière à offrir la possibilité aux conducteurs de mettre en service ou non l'assistance. Avec le temps, cette possibilité tend à disparaître et l'ABS est actif en permanence sans que les conducteurs ne puissent mettre le dispositif hors service.

Au contraire, les assistances de type **automatisation de la conduite** reposent généralement sur des niveaux de contrôle de l'activité plus symboliques et impliquent une véritable coopération entre conducteurs et assistances. Le régulateur de vitesse et d'inter-distance ou encore les alertes aux collisions avec le véhicule précédent, peuvent être mis en avant pour illustrer cette catégorie d'automatisation. Le régulateur de vitesse allège les activités symboliques des conducteurs en prenant en charge les activités d'estimation de la vitesse du véhicule précédent et en adaptant la vitesse du véhicule piloté en conséquence. Les alertes aux collisions avec le véhicule précédent aident les conducteurs à prendre la décision de l'exécution d'une manœuvre d'urgence. Pour ces deux exemples, et pour cette catégorie d'assistance en général, les interférences de l'assistance avec l'activité des conducteurs sont importantes et peuvent prendre des formes variées.

La prise en compte de la distinction automatisation du véhicule et automatisation de la conduite, implique une redéfinition des modes d'assistances décrits par Hoc et al. (sous presse). La figure 10 représente sur un continuum l'ensemble des catégories d'assistances envisagées avec une application au contrôle latéral. La flèche noire représente l'intrusion croissante de l'assistance dans l'activité de guidage latéral. Cette plus grande intrusion va de pair avec de plus nombreuses interférences entre homme et machine. À cet égard, les catégories automatisation du véhicule et automatisation de l'activité de conduite sont considérées comme juxtaposées, la seconde suivant la première.

La catégorie automatisation du véhicule n'a pas été subdivisée en sous-catégories car une seule assistance dédiée au contrôle latéral entre dans cette catégorie. Il s'agit du correcteur électronique de trajectoire (ESP) qui aide le conducteur à se maintenir sur la trajectoire désirée. Mis à part la possibilité d'engager ou de désengager le dispositif d'assistance (comme pour l'ABS à ses débuts) et ce, bien en amont de la situation impliquant le déclenchement du dispositif. Les interventions de l'assistance reposent uniquement sur la prise en compte de certaines caractéristiques dynamiques du véhicule. Ces opérations sont pratiquement transparentes pour le conducteur et sont assimilées aux caractéristiques dynamiques du véhicule.

Le modèle de Hoc et al. (sous presse) a été largement réinvesti dans la définition des sous-catégories d'automatisation de l'activité de conduite. Ainsi appliqué au maintien du contrôle latéral, le mode perceptif est envisagé comme un enrichissement perceptif de la position latérale du véhicule. Un dispositif tête haute permettant l'amélioration de la visibilité des bords de voie, est une bonne illustration d'une assistance au contrôle latéral entrant dans cette catégorie.

Le mode contrôle mutuel a été réorganisé de manière à mieux prendre en compte l'individu dans les interférences qu'il entretient avec l'assistance. La classification entre mode avertissement, mode suggestion d'action et mode limite nous a semblé trop liée à des dispositifs techniques et pas assez à l'implication des conducteurs dans les activités coopératives. Une dichotomie entre assistances destinées à avertir les conducteurs et celles destinées à agir sur le contrôle du véhicule avec eux a donc été préférée (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000). Selon ces auteurs, et parmi divers niveaux d'assistance, deux catégories d'assistances sont distinguables : celles qui détectent des événements jugés anormaux et qui en alertent les individus, et celles faisant l'acquisition et le traitement d'informations dans l'environnement avec pour objectif d'indiquer aux individus la réponse adéquate. La deuxième catégorie d'assistance est donc à l'origine du déclenchement d'un comportement humain et agit conjointement aux individus sur le contrôle du système. Cette dichotomie est adaptable au contrôle latéral avec les modes avertissement et co-action. Dans la gestion du guidage latéral du véhicule les systèmes d'alertes aux sorties de voie (SAS)

correspondent au mode avertissement. Ces dispositifs alertent les conducteurs d'un positionnement latéral jugé dangereux. La suggestion d'action entre dans cette catégorie dans la mesure où son intervention n'affecte pas la directement la position latérale du véhicule. Au contraire, les assistances limitatives et correctives appartiennent au mode co-action, les conducteurs et l'assistance intervenant tous deux dans la régulation de la position latérale du véhicule. Ainsi, ces assistances sont considérées comme des systèmes d'aide au maintien dans la voie (SAM). Les assistances de type contrôle partagé, où conducteur et assistance agissent en même temps sur le volant (ex. : Griffiths & Gilespeie, 2005) appartiennent également à la sous-catégorie co-action.

Le mode délégation de fonction se trouve être modifié de par l'introduction de la différenciation entre automatisation du véhicule et automatisation de l'activité de conduite. Seul ce qui était appelé mode régulé dans la terminologie de Hoc et al. (sous presse) demeure au sein de cette catégorie. Le régulateur de position latérale est l'équivalent du régulateur de vitesse et d'inter-distance pour le contrôle latéral. Cette assistance maintient le véhicule dans sa voie de circulation sans intervention des conducteurs. Toutefois, ce dispositif n'est pas en mesure de détecter et donc de gérer l'évitement d'obstacles sur la chaussée.

Ces activités de détection et d'évitement d'obstacles seraient en revanche existantes pour un mode complètement automatisé. L'assistance se présenterait alors comme un pilote automatique. Ce type d'assistance est envisageable techniquement, toutefois peu de travaux sont entrepris dans cette direction.

Automatisation du véhicule	Automatisation de l'activité de conduite				
Automatisation autonome	Mode perceptif	Mode contrôle mutuel		Mode délégation de fonction	Mode complètement automatisé
		Mode avertissement	Mode co-action		
Correcteur électronique de trajectoire (ESP)	Amélioration de la visibilité des bords de voie	Système d'avertissement aux sorties de voies (SAS)	Système d'aide au maintien dans la voie (SAM)	Régulateur de position latérale (RPL)	Pilote automatique

Figure 10. Représentation d'une automatisation croissante du contrôle latéral d'un véhicule. La partie supérieure de la figure présente les niveaux d'automatisation et la partie basse représente les différents dispositifs d'assistance classés selon ces niveaux.

Pour **synthétiser**, une fusion des cadres théoriques développés par Young et al. (2007) et Hoc et al. (sous presse) est proposée. Les différents niveaux d'automatisation issus de cette fusion ont été mis en relation avec les différentes assistances dédiées au contrôle latéral (Figure 10).

III. LES ASSISTANCES AU CONTROLE LATERAL

Sur la base de la catégorisation précédente, cette partie présente un état de l'art des différents travaux menés sur les assistances au contrôle latéral. Les différents dispositifs mis en regard des différents niveaux d'automatisation sont présentés. La même logique de présentation a été adoptée pour l'ensemble des sous-parties de ce troisième chapitre. Ainsi, après une première étape descriptive du fonctionnement de chaque dispositif décrit, ses incidences sur les comportements des conducteurs seront exposées. Cette partie présentera successivement le correcteur électronique de trajectoire, unique dispositif représentant la catégorie d'automatisation du véhicule, puis, les assistances catégorisées comme automatisation de l'activité de conduite. Toutes les assistances de ce deuxième type sont clairement génératrices d'interférences (conçues pour être facilitatrices) avec les conducteurs. C'est donc un cadre théorique relevant de la coopération homme-machine qu'il convient d'utiliser pour les étudier. Les différents modes de coopération homme-machine précédemment identifiés (cadre général, partie II.3) seront présentés séquentiellement.

III.1 AUTOMATISATION DU VEHICULE : L'ESP

III.1.1 Présentation du correcteur électronique de trajectoire

La catégorie automatisation du véhicule telle qu'elle a été décrite précédemment correspond nécessairement à l'automatisation autonome d'une partie de l'activité de conduite. Ce type d'automatisation qualifiable de transparente, n'est pas destiné à interférer avec les conducteurs mais à améliorer le comportement dynamique du véhicule. Pour le contrôle latéral, une seule assistance entre dans cette catégorie : le correcteur électronique de trajectoire (ESP)². Différents types d'ESP aux noms et caractéristiques techniques variables ont été développés par diverses entreprises. Néanmoins, leur principe de fonctionnement général demeure similaire. Ce système corrige la trajectoire en agissant sur le système de

² L'abréviation ESP de l'Anglais « *Electronic Stability Program* » a été conservé dans le texte, car c'est cette terminologie générique dont il est couramment fait usage, y compris dans le monde francophone.

freinage du véhicule. Pour une description détaillée des composants et fonctions de l'ESP, voir Van Zanten (2000, 2002). Lorsque le conducteur d'un véhicule équipé de l'ESP prend un virage à trop grande vitesse, le véhicule peut perdre de l'adhérence avec la chaussée et donc entrer en dérapage. Deux types différents de comportements du véhicule sont alors envisageables : soit le véhicule sous-vire, soit il survire. Dans le cas d'un sous-virage, ce sont les roues avant du véhicule qui dérapent, l'angle des roues n'est alors plus corrélé à la trajectoire du véhicule. Le véhicule ne suit plus la courbure de la route et a tendance à aller tout droit. Dans le cas du survirage, ce sont les roues arrière qui dérapent suite à une perte d'adhérence. L'arrière du véhicule tend alors à « rattraper » l'avant, entraînant un risque de tête-à-queue. Pour détecter les cas de sous-virage et de survirage l'ESP, a recours, à minimum, à des capteurs placés au niveau des quatre roues et du volant. Des calculateurs sont chargés de comparer la vitesse des quatre roues entre elles et de vérifier si la position angulaire du volant (souhaitée par le conducteur) est en adéquation avec la direction des roues. Dans les cas où la vitesse des roues avant et arrière est différente et où la position angulaire du volant ne correspond pas à la direction des roues, le système intervient en freinant de une jusqu'à trois des roues. La figure 11 présente l'exemple de la situation de sous-virage. Sur la figure, les deux roues avant dérapent et le véhicule tend à aller tout droit au lieu de suivre la courbure du virage vers la droite. L'ESP va alors actionner un freinage de la roue arrière droite de manière à rectifier la trajectoire du véhicule. Il est à noter que les concepteurs d'ESP utilisent des stratégies différentes pour maintenir le véhicule sur la bonne trajectoire. Il est par exemple possible, dans ce cas, de freiner les deux roues se situant à l'intérieur du virage si le sous-virage est important.



Figure 11. Exemple de déclenchement de l'ESP lorsque le véhicule est en situation de sous-virage.

III.1.2 Incidences de l'ESP sur les conducteurs et l'accidentologie

L'ESP est utile aux conducteurs lorsque ceux-ci surévaluent la vitesse de négociation d'un virage (ex. : négociation d'un virage à 70 km/h au lieu de 50 km/h) et lorsque les conducteurs tournent leur volant trop brusquement pour une quelconque raison (par exemple, lors de

l'évitement d'un obstacle ou après un écart important par rapport à la trajectoire désirée). Il est également attendu que l'ESP soit utile aux conducteurs en conditions d'adhérence dégradées (ex. : route mouillée, neigeuse, ou glacée), ou bien encore lors de la combinaison de deux ou trois de ces situations (Sferco, Page, Lecoq & Fay, 2001).

Comme décrit précédemment, l'ESP est un dispositif d'assistance considéré comme une nouvelle caractéristique du véhicule plutôt qu'une assistance avec laquelle les conducteurs doivent interagir. De ce point de vue, l'ESP est un dispositif proche de l'ABS, les deux ayant en commun de ne pas interférer avec les actions des conducteurs, mais plutôt d'optimiser leurs actions presque à leur insu. Pour preuve, les conducteurs ne connaissent pas nécessairement le mode de fonctionnement de l'assistance. Ce rapport homme-machine particulier s'est déjà révélé être générateur de problèmes d'utilisation avec l'ABS. En effet, cette assistance ne s'est pas montrée aussi efficace qu'attendu lorsque des études sur l'accidentologie réelle ont été menées (Farmer, 2001 ; Kahane, 1994). Cette moindre efficacité a été expliquée par une mauvaise utilisation de l'assistance. Certains conducteurs relâchaient la pédale de frein pour éviter que les roues ne se bloquent, alors que cette tâche est déjà prise en charge par l'assistance. Une autre explication consiste à penser que les conducteurs cherchent à maintenir un niveau de risque constant (concept d'homéostasie du risque ; Wilde (1982)). Ainsi, les bénéfices apportés par les dispositifs d'assistances seraient amoindris par des prises de risques accrues. Toutefois, à notre connaissance, aucun résultat faisant état de telles adaptations comportementales n'a encore été rapporté avec l'ESP.

L'ESP est la première assistance dévolue au contrôle latéral du véhicule à avoir été disponible sur le marché. Cette assistance a fait son apparition en 1995 en Europe et quelques années après aux États-Unis (Memmer, 2001). Cette période de temps autorise à déterminer l'influence de l'ESP sur l'accidentologie réelle. Toutefois, l'efficacité observée de l'ESP sur l'accidentologie dépend des indicateurs utilisés et des accidents ciblés par les études. Une revue des études existantes concernant l'impact de l'ESP sur le nombre d'accidents nous a conduits à les classer en trois catégories : celles portant sur la réduction des accidents de manière générale (Tableau 7), celles spécifiques aux accidents suivant une perte de contrôle (Tableau 8) et celles quantifiant l'impact sur les accidents cibles de l'ESP (Tableau 9 ; voir Page & Cuny, 2006 pour une description des accidents cibles de l'ESP). Chaque tableau est composé d'une ligne par étude et de cinq colonnes. Ces colonnes renseignent respectivement des auteurs de l'étude, du type d'étude, du pays où l'étude a été conduite, d'éventuelles conditions spécifiques et de l'effet de l'ESP. Pour les études portant sur l'analyse des accidents enregistrés en conduite réelle, deux types d'études coexistent : les études « avant-après », qui comparent le nombre d'accidents avant l'introduction de l'ESP sur le marché et une fois qu'il y est implanté, et les études « cas contrôle », qui sont menées sur un ou plusieurs modèles de véhicules commercialisés sans ESP dans un premier temps, puis ayant été dotés de l'ESP.

Tableau 7. Études présentant les effets globaux du correcteur électronique de trajectoire sur l'accidentologie.

Étude	Données sources	Pays	Conditions particulières	Pourcentage de réduction
Bahouth (2005)	Analyse des accidents, étude "avant-après"	États-Unis		12% des accidents frontaux impliquant plusieurs véhicules 53% des accidents frontaux impliquant un seul véhicule
Farmer (2004)	Analyse des accidents, étude "avant-après"	États-Unis		41% du risque d'accident impliquant un seul véhicule 56% des accidents mortels impliquant un seul véhicule
Farmer (2006)	Analyse des accidents, étude "avant-après"	États-Unis	Véhicules tous terrains	32-37% des accidents impliquant plusieurs véhicules
			Véhicules légers	25% des accidents impliquant plusieurs véhicules
Aga & Okada (2003)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	Japon		35% des accidents impliquant un seul véhicule 30% des accidents frontaux
Thomas (2006)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	Royaume Uni		19% des accidents graves où mortels
			route mouillée	34% des accidents graves où mortels
			route gelée	53% des accidents graves où mortels
Dang (2004)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	États-Unis	Véhicules de particuliers	35% des accidents impliquant un seul véhicule et 30% des accidents mortels impliquant un seul véhicule
			Véhicules tous terrains	67% des accidents impliquant un seul véhicule et 63% des accidents mortels impliquant un seul véhicule
Lie et al. (2004)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	Suède		22% d'efficacité
			route mouillée	32% d'efficacité et 56% pour les accidents graves ou mortels
			route gelée ou enneigée	38% d'efficacité et 49% pour les accidents graves ou mortels

Indépendamment du type d'accidents analysés dans les études présentées dans le 0, l'ESP réduit le nombre d'accidents de 19 à 67%. De grandes différences apparaissent en fonction

du type d'accidents considérés, de leur gravité, du type de véhicule impliqué et de l'état de la route. Sans surprise, les accidents impliquant un seul véhicule sont plus sensibles aux effets de l'ESP que les accidents impliquant plusieurs véhicules. Avec l'usage de l'ESP, les pertes de contrôle et les accidents qui en découlent sont réduits de 25 à 70% selon les études (Tableau 8). Par ailleurs, l'ESP entraîne des réductions de 22 à 45% des accidents qu'il ciblait (Tableau 9), et même davantage pour les accidents mortels.

Tableau 8. Études présentant les effets du correcteur électronique de trajectoire sur la perte de contrôle du véhicule.

Étude	Données sources	Pays	Conditions particulières	Pourcentage de réduction
Becker et al. (2004)	Estimation	Allemagne		45% des blessures causées par une perte de contrôle
Yamamoto & Kimura (1996)	Étude sur piste d'essais		Virages glissants	40% des sorties de voie
Papelis et al. (2004)	Simulateur			25% des pertes de contrôle
Unsel et al., 2004	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	Allemagne		40% des accidents liés à une perte de contrôle
Green & Woodrooffe (2006)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	États-Unis	Véhicules tous terrains	70% des accidents liés à une perte de contrôle
			différences hommes/femmes	Pas de différences significatives

Tableau 9. Études présentant les effets du correcteur électronique de trajectoire sur ses accidents cibles.

Étude	Données sources	Pays	Conditions particulières	Pourcentage de réduction
Tingvall et al. (2003)	Analyse des accidents, étude "avant-après"	Suède		22% des accidents cibles de l'ESP
Kreiss et al. (2006)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	Allemagne		32% des accidents cibles de l'ESP 56% des accidents mortels cibles de l'ESP
			Amélioration de la finesse des résultats en appliquant une nouvelle méthodologie	54% des accidents cibles de l'ESP 78% des accidents mortels cibles de l'ESP
Page & Cuny (2006)	Analyse des accidents, étude "cas contrôle"	France		44% des accidents cibles de l'ESP

III.1.3 Conclusions sur le correcteur électronique de trajectoire

D'après la commission Européenne, 9% des véhicules circulant en Europe en 2005 étaient équipés de l'ESP. Il a été prédit une augmentation du niveau d'équipement dans les années à venir pour atteindre 50% des véhicules en 2025. Par conséquent, il s'agit d'une assistance à laquelle la majorité des conducteurs seront confrontés.

L'ESP occupe une place particulière dans le domaine des assistances au contrôle latéral. Premièrement, c'est la première assistance à avoir fait son apparition sur le marché. Il s'agit par conséquent de la première étape d'une aide au contrôle latéral du véhicule. Pour les conducteurs, l'introduction d'une assistance au contrôle latéral s'est donc faite par le biais d'une amélioration des caractéristiques dynamiques du véhicule. Deuxièmement, cette assistance intervient alors que le véhicule se trouve déjà être dans une situation critique (dérapage). L'ESP est donc une assistance réactive activée uniquement de manière à récupérer une situation déjà critique. Pour élargir son domaine de validité et notamment agir préventivement, l'assistance au contrôle latéral envisagée ne peut se cantonner à une simple automatisation du véhicule. Au contraire, cette assistance aura à entrer véritablement en interférence avec les conducteurs au cours de l'activité de conduite. L'apparition de telles interférences a pour incidence de faire basculer l'assistance considérée dans la catégorie automatisation de l'activité de conduite ; catégorie à laquelle appartiennent l'ensemble des dispositifs qui vont être présentés à présent.

Pour **synthétiser**, du point de vue des conducteurs, l'ESP est perçu comme une modification des caractéristiques dynamiques du véhicule. Les conducteurs ne sont pas nécessairement informés de son mode de fonctionnement et ses activités sont transparentes. Aucune adaptation comportementale faisant suite à l'utilisation de l'ESP n'est avérée. Cette assistance s'est révélée être efficace dans la réduction des accidents, notamment ceux relatifs à une perte de contrôle du véhicule. Toutefois, le très restreint domaine de validité de cette assistance ne permet pas d'intervenir de manière préventive. Au contraire, l'ESP est activé en réaction à une situation devenue critique.

III.2 PERCEPTION AUGMENTEE

III.2.1 Principe de fonctionnement

Dans la figure 10, la catégorie d'assistance est présentée sous le terme générique d'« amélioration de la visibilité des bords de voie ». Néanmoins, l'ensemble des assistances constituant cette catégorie ne se bornent pas à rendre les bords de voie plus visibles. A l'heure actuelle et à notre connaissance, peu d'études portant sur le contrôle latéral avec le mode perceptif ont été menées. Les assistances intégrant cette catégorie agissent comme une

extension des organes sensoriels. Elles ont pour vocation de les aider à prélever les informations nécessaires au guidage latéral du véhicule. Le rôle primordial de la vision en conduite automobile explique le fait que seules des assistances visuelles de type mode perceptif aient été envisagées pour le moment.

Comme introduit dans la partie 0 du cadre général, la nature de l'information fournie par l'assistance peut être symbolique ou subsymbolique. Une assistance de nature symbolique pourrait représenter la position du véhicule sur sa voie au moyen d'un dispositif lumineux embarqué, tel qu'il a déjà été imaginé pour le contrôle longitudinal du véhicule avec le radar anti-collision (Malaterre & Saad, 1986). Dans le cas présent, le nombre de diodes allumées serait inversement proportionnel à la distance séparant le véhicule d'un bord de la voie. De sorte qu'à mesure qu'un conducteur se rapproche d'un bord de voie, le nombre de diodes allumées augmente. A notre connaissance, ce type d'assistance n'a jamais été étudié, probablement de par le fait qu'il obligerait les conducteurs à regarder dans le véhicule pour obtenir une information déjà directement disponible dans leur scène visuelle. Cette assistance pourrait toutefois être bénéfique en conditions de visibilité dégradées, lorsque celles-ci rendent l'évaluation de la position du véhicule sur la voie difficile.

Une assistance de nature subsymbolique interviendrait au niveau des stratégies de prises d'informations visuelles, impliquant ainsi une situation de réalité augmentée superposant des informations virtuelles aux informations réelles de la scène visuelle. En conduite automobile, le recours aux futures générations de dispositifs tête haute (Figure 4), pourrait servir à la transmission d'informations virtuelles en deux ou trois dimensions superposables aux informations visuelles réelles dont les conducteurs disposent.

III.2.2 Influence de la catégorie d'assistance sur les conducteurs

Actuellement, dans le cadre des assistances à la conduite, la situation de réalité augmentée est singulière. Ceci car l'objectif poursuivi n'est pas de compléter la vision qu'a un individu du monde mais de mettre en évidence certaines informations préalablement jugées particulièrement pertinentes. Surviennent alors les questions relatives au choix des informations pertinentes et au(x) moment(s) opportun(s) pour délivrer ces informations virtuelles. Les informations nécessaires au maintien d'un véhicule sur sa voie de circulation sont diverses. L'importance d'un point particulier dans la scène visuelle (point tangent, Land & Lee, 1994) a déjà été évoquée, de même que l'importance de l'usage de la vision périphérique dans le maintien du contrôle latéral (Summala et al., 1996). Il apparaît alors que le marquage au sol pourrait jouer un rôle important dans le maintien du véhicule sur sa voie de circulation.

Le marquage fournit des informations visuelles pertinentes et facilement accessibles en vision périphérique. Certaines données de l'accidentologie appuient ces propos. Ainsi, en

2003, 75% des accidents ruraux survenant aux Etats-Unis ont été observés sur des routes à double sens sans marquage au sol. Agent, Pigman, Stamatiadis (2001) rapportent que le taux d'accidents fatals sur les routes rurales à double sens de circulation du Kentucky est environ deux fois supérieur au taux d'accidents fatals de l'ensemble des routes entretenues par l'État. La majeure partie de ces routes rurales ne disposaient pas de marquage au sol. En conséquence, une réponse à la question du moment d'intervention des assistances peut être avancée : il s'agit d'un dispositif mettant en avant les bords de voie en continu. Ce dispositif d'assistance a été expérimenté sur des chasse-neiges en conditions de visibilité dégradées (Steinfeld & Tan, 2000). Lorsque la route est recouverte de neige, maintenir le chasse-neige sur la voie de circulation peut se révéler être une tâche particulièrement difficile. De plus, le chemin tracé par le chasse-neige est très important pour les autres véhicules qui suivront ce chemin. Ces auteurs montrent que l'usage d'un dispositif donnant une information sur la position des bords de voie et la position du véhicule dans la voie est apprécié des conducteurs et ne nécessite qu'une courte période d'apprentissage. Dans cette étude, pour des raisons pratiques propres à l'étude, un dispositif « tête basse » a été utilisé. Toutefois les auteurs envisagent la possibilité de faire évoluer le dispositif vers un affichage tête haute.

Le marquage au sol permet une détection plus facile du point tangent. Mars (2006, 2008a), dans une étude sur simulateur de conduite déjà présentée (cadre général, partie I.2.1), contraignait les conducteurs à suivre du regard un point cible situé dans la région du point tangent, soit directement sur ce point, soit à la même distance mais décalé latéralement. Le point à suivre était matérialisé par une borne (Figure 12). Le positionnement latéral moyen observé est similaire sans borne à poursuivre visuellement qu'avec une borne placée dans la voie de circulation. Lorsque le regard était contraint sur le point tangent ou sur la voie opposée, les conducteurs coupaient moins le virage (positionnement latéral plus proche du bord de la route pour un virage à gauche et inversement pour un virage à droite). Une amélioration de la stabilité de la trajectoire (diminution de la variabilité de la position latérale et du nombre de changements de direction au volant) par rapport à la situation contrôle est observée, quelle que soit la position de la borne à suivre. Ces résultats viennent renforcer ceux obtenus précédemment par Mestre, Mars, Durand, Vienne et Espié (2005) en affirmant le bénéfice de l'affichage d'une borne indiquant aux conducteurs la trajectoire à suivre. Cette conclusion est à nuancer car lors d'une nouvelle étude sur simulateur, Mars (2008b) a cherché à déterminer si l'indication du point tangent influençait les stratégies visuelles spontanées des conducteurs et si ce point pouvait aider lors de situations critiques. Les résultats montrent que lorsque le point tangent est matérialisé par une borne mais que les conducteurs ne sont pas contraints de le regarder, la position de leur regard est légèrement attirée par la borne mais reste très proche de ce qui est observé sans l'affichage de la borne. La présence de la borne n'améliore pas la stabilité de la trajectoire en condition de conduite normale comme lors de perturbations latérales (simulation d'une rafale de vent

latérale amenant à un écart important sur la voie). Cette étude met donc en avant que la matérialisation du point tangent, sans obligation de le regarder, n'a que peu d'effets sur le contrôle de la trajectoire et sur les stratégies d'exploration visuelles. Cette matérialisation ne permet pas non plus d'améliorer les manœuvres de retour vers le centre de la voie lors de perturbations latérales. L'indicateur visuel n'est donc pas utilisé spontanément dans de bonnes conditions de visibilité. L'auteur suggère que les avantages de cet indicateur sont probablement à rechercher, en condition de visibilité dégradée.

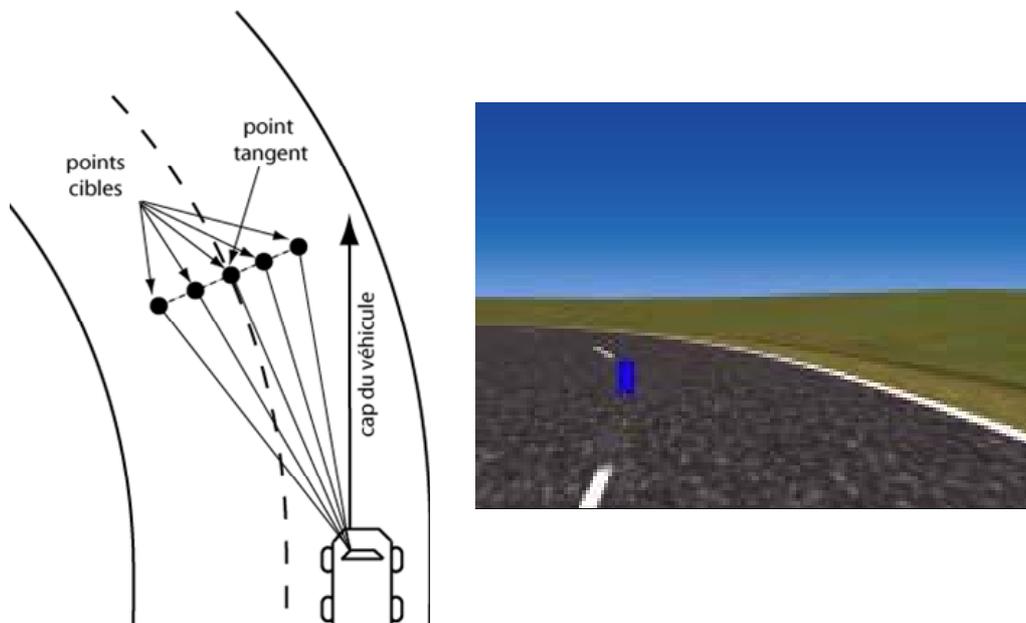


Figure 12. Représentation des différents points cibles et illustration de la borne utilisée pour marquer un de ces points (ici point tangent) dans l'étude de Mars (2006, 2008a).

Pour conclure, il semble que les bénéfices d'assistances de type mode perceptif soient plutôt à rechercher en conditions de visibilité dégradées (ex. : route enneigée, absence de marquage au sol, brouillard, ou encore forte pluie). Si l'information visuelle supplémentaire fournie par l'assistance est pertinente, il est peu envisageable de voir apparaître des effets négatifs liés à l'usage de ce type d'assistances. Au-delà des problèmes technologiques posés par l'utilisation d'afficheurs tête haute, les problèmes relatifs au moment et à la nature des informations visuelles à fournir demandent encore à être étudiés.

Pour **synthétiser**, les assistances de type mode perceptif visent à améliorer la perception visuelle des informations nécessaires au maintien de la trajectoire. Améliorer la visibilité des bords de voie ou mettre en avant le point tangent, particulièrement au moyen d'afficheurs tête haute, semble apporter quelques bénéfices en conditions de visibilité dégradées.

III.3 LES SYSTEMES D'AVERTISSEMENT AUX SORTIES DE VOIES

En se basant sur les verbalisations des conducteurs, Biester et Bosch (2005) rapportent que les conducteurs ont plus confiance dans l'assistance et ont une meilleure conscience de la situation lorsqu'ils se trouvent être en contrôle coopératif plutôt qu'en contrôle manuel, semi-automatique ou automatique. Ce que Biester et Bosch appellent « contrôle coopératif » correspond à la catégorie contrôle mutuel, telle qu'elle a été définie par Hoc et al. (sous presse). Ces résultats tendent à favoriser le développement d'assistances de type mode contrôle mutuel où conducteurs et assistances réalisent une même tâche en parallèle. Les deux agents de l'équipe homme-machine sont donc impliqués au même moment dans une tâche donnée. Pour le contrôle latéral, les assistances dites « systèmes d'avertissement aux sorties de voie » (SAS) et « système d'aide au maintien dans la voie » (SAM)³ entrent toutes deux dans cette catégorie. Les assistances SAS et SAM se distinguent toutefois très clairement par leurs activités et donc par leurs implications différentes sur les activités coopératives. Ainsi, les SAS émettent une critique sur le positionnement latéral choisi par les conducteurs, tandis que les SAM partagent transitoirement, ou en continu, le contrôle de la trajectoire du véhicule. Par ailleurs, Biester et Bosch (2005) ont trouvé que la tâche de maintien du véhicule dans la voie est considérée par les conducteurs comme une tâche où assistance et conducteur ont des droits égaux. En effet, les conducteurs ont rangé cette activité entre 3 et 5 sur une échelle allant de 1 (tâche totalement manuelle) à 7 (tâche totalement automatique). En conséquence, l'activité de maintien du véhicule dans la voie présente un fort potentiel pour les activités coopératives.

III.3.1 Les assistances au contrôle latéral de type avertissement

- **Les bandes rugueuses : un prototype des SAS**

La plupart des conducteurs ont déjà expérimenté un avertissement à sortie de voie. En effet, les bandes rugueuses parfois utilisées en complément du marquage au sol constituent un avertissement à sortie de voie. En ce sens, les bandes rugueuses sont des avertissements à sortie de voie déjà disponibles sur nos routes depuis plusieurs années. En France, lorsque le véhicule se trouve être en situation de sortie de voie imminente, un ou deux pneumatiques entrent en contact avec les bandes rugueuses positionnées au niveau des limites de la voie telles que définies par le marquage au sol. Le passage sur les bandes rugueuses génère un

³ Les termes système « d'avertissement aux sorties de voie » et « système d'aide au maintien dans la voie » sont respectivement des traductions de l'Anglais « *lane departure warning systems* » et « *lane keeping assistance systems* ».

bruit caractéristique auquel vient parfois s'ajouter une vibration du volant et, plus globalement, de l'ensemble du véhicule.

De manière générale, les bandes rugueuses peuvent être utilisées à deux endroits sur la route : pour délimiter les bords de route et pour délimiter des voies de circulation (opposées ou de même sens). Les résultats sont contradictoires pour les bandes rugueuses délimitant les voies de circulation. D'une part, Persaud, Retting et Lyon (2003) rapportent une réduction de 25% des accidents (portant atteinte à l'intégrité physique) dans la voie ou avec des véhicules circulant sur la voie opposée, après que des bandes rugueuses aient été installées au centre de la route. D'autre part, Räsänen (2005) n'observe aucun changement dans la prise de virage après avoir installé des bandes rugueuses au centre de la route. En revanche, cette étude confirme l'importance du marquage au sol dans la tâche de maintien du véhicule sur sa voie. Cet auteur observe en effet une réduction de 2.5 à 9.2% du nombre de chevauchement de la ligne marquant le centre de la route après que celle-ci ait été repeinte.

Lorsque, comme sur certaines routes françaises, les bandes rugueuses sont placées sur les lignes marquant les bords de voie, l'avertissement fourni aux conducteurs intervient juste avant la sortie de route. Certaines routes américaines sont équipées d'une partie de chaussée praticable entre le marquage au sol et le bord de route. Les bandes rugueuses sont alors positionnées sur cette partie de la chaussée. L'efficacité de différents types de bandes rugueuses a été évaluée par Morena (2003). Respectivement les bandes rugueuses « *rolled-in rumbles* » et les bandes rugueuses intermittentes ont réduit de 20% le nombre d'accidents liés aux sorties de route (dus uniquement aux conducteurs distraits ou somnolents). Une réduction supplémentaire de 19% a été enregistrée lors de l'utilisation de bandes rugueuses de type « *milled rumble strip* ». Ces dernières produisent 3.4 fois plus de bruit et sont 12.6 fois plus rugueuses que celles de type « *rolled-in rumbles* » (Federal highway administration, 2007).

Toutefois **l'usage de bandes rugueuses est limité** aux sorties de routes imminentes. De plus, le poids, la largeur, la vitesse du véhicule ou encore l'usage du clignotant pour les bandes rugueuses placées au centre de la route ne sont pas considérés. De manière à offrir une meilleure prise en compte de la situation et une plus grande adaptabilité aux conducteurs, les dispositifs appelés SAS ont été imaginés.

- **Principe de fonctionnement des SAS**

Les assistances d'avertissement aux sorties de voie correspondent à des dispositifs embarqués capables de situer latéralement le véhicule sur sa voie. Un avertissement est délivré aux conducteurs lorsque le véhicule est sur le point de quitter sa voie de circulation. Les SAS déjà disponibles ont recours au marquage au sol pour situer le véhicule dans sa voie. Pour la plupart des SAS, des caméras fixées sur le véhicule sont chargées de filmer le

marquage au sol en amont du véhicule. La position du véhicule relativement au marquage au sol est ensuite calculée. Un avertissement est délivré si le véhicule est trop près d'un bord de voie et que le clignotant n'a pas été actionné. Si le clignotant est en activité, le dispositif considère alors que les conducteurs ont volontairement entrepris de changer de voie de circulation ou de s'arrêter sur le bord de la route. Les dispositifs SAS Citroën déjà commercialisés et dénommés AFIL (Alerte de Franchissement Involontaire de Lignes ; site internet Citroën, 2008) ont recours à une autre technologie que celle présentée. Le SAS installé sur leurs véhicules détecte simplement le franchissement d'une ligne à l'aide de capteurs infrarouges. L'avertissement est alors déclenché à ce moment. Différentes variables peuvent être utilisées pour déclencher l'avertissement. Chronologiquement, c'est un écart latéral entre le véhicule et le bord de voie dont il a été fait usage. Actuellement, certains dispositifs, en plus d'un écart latéral, prennent en compte la vitesse du véhicule. Ainsi, un temps avant sortie de voie (TLC)⁴ est parfois utilisé pour déclencher les avertissements. Divers modes de calculs du TLC sont possibles (Winsum & Godthelp 1996).

Les SAS sont donc uniquement des dispositifs d'avertissement qui ne peuvent pas agir directement sur la trajectoire du véhicule. Par conséquent, les conducteurs restent pleinement responsables de l'activité de guidage du véhicule. Tel qu'il a été présenté, le principe de fonctionnement des SAS est assez simple. Toutefois derrière ce mode de fonctionnement global, il existe de nombreuses possibilités de différenciation entre SAS au niveau de l'avertissement fourni. Ces différences entre dispositifs amènent à des effets différenciés sur les comportements de conducteurs.

- **Les systèmes d'aide à l'évitement de collisions lors de changement de voie : un complément aux SAS ?**

Les systèmes d'aide à l'évitement de collisions lors de changement de voie (SEC) sont un autre type de dispositif lié à l'activité de contrôle latéral du véhicule. Contrairement à l'activité de maintien dans la voie, les conducteurs considèrent l'activité de changement de voie comme principalement manuelle (Biester & Bosch, 2005). Sur une échelle allant de 1 (tâche totalement manuelle) à 7 (tâche totalement automatique), le positionnement moyen de cette activité est inférieur à 2 ; ce qui en fait une activité parmi celles classées comme les plus manuelles avec « accélérer » et « négocier un virage ». Cette activité apparaît donc comme une activité coopérative moins prometteuse que le maintien dans la voie. Les SEC avertissent les conducteurs lorsqu'un changement de voie de circulation est entrepris et qu'un autre

⁴ TLC de l'Anglais « *Time to Lane Crossing* ». Celui-ci correspond au temps avant qu'une sortie de voie ne se produise si la vitesse et la direction du véhicule ne sont pas modifiées.

véhicule se trouve sur la voie de destination (voir Tijernia, 1999 pour une revue). Les avertissements fournis par des SEC ne sont pas uniquement liés au contrôle latéral, mais également à l'activité d'identification de risques. Ce sont aussi des assistances à la prise de décision. En conclusion, ces dispositifs d'assistance sont principalement dévolus à la réduction des accidents impliquant plusieurs véhicules et peuvent être un bon complément aux SAS.

III.3.2 Influence des SAS sur les conducteurs

Plusieurs études se sont portées sur l'évaluation des SAS. Toutes les études répertoriées appuient l'idée que l'usage de SAS est bénéfique. En conditions normales de conduite, un meilleur maintien du véhicule sur sa voie a été observé avec un SAS. Même si ce n'est que tendanciel, des réponses plus rapides ont été enregistrées avec SAS (Tijernia et al., 1996). Des temps de réponse plus courts lors de sorties de voie ont également été rapportés pour des dispositifs utilisant les modalités auditives ou vibro-tactiles (Rossmeier, Grabsch & Rimini-Döring (2005) et Kozak, Pohl, Birk, Greenberg, Artz, Blommer et al. (2006) avec des conducteurs somnolents). Le nombre (Rimini-Döring, Altmueller, Ladstaetter & Rossmeier, 2005) et la durée des sorties de voie (Hoc et al., 2006 ; Kozak et al., 2006) sont réduits avec l'usage de SAS. La taille des sorties de route (taille de l'écart à la voie) est également réduite par l'usage de SAS (Tijernia et al., 1996).

- **Processus de traitement de l'avertissement et signification du signal**

Rogers, Lamson et Rousseau (2000) proposent un modèle décrivant simplement les étapes du mécanisme de traitement d'un avertissement par l'humain. Ce modèle est composé de quatre grandes étapes que sont l'alerte, l'encodage, la compréhension et l'exécution d'une action relative à l'avertissement. La première étape de l'avertissement est donc d'alerter les conducteurs (voir cadre général, partie 0). Cette étape est un préalable aux trois suivantes ; il est en effet nécessaire que l'avertissement soit remarqué et attire suffisamment l'attention afin de pouvoir être pris en compte. Il existe des alertes plus efficaces que d'autres, notamment en fonction de la modalité sensorielle sollicitée, du caractère fréquent ou rare de l'alerte, etc. Une fois les individus alertés, le processus de traitement de l'information d'avertissement reçue peut se poursuivre. Les individus traduisent et enregistrent alors en mémoire l'avertissement comme une représentation interne. Le signal d'avertissement doit ensuite être compris. Cela signifie qu'après avoir été alertés par le signal et l'avoir encodé, il est nécessaire aux individus d'interpréter le signal de manière à en comprendre le sens. Dans un dernier temps, les individus décident d'entreprendre une action suite à l'avertissement reçu. Comme pour les trois étapes précédentes, il est possible de faciliter l'exécution de l'action suivant l'avertissement. Racicot et Wogalter (1995) montrent par exemple, que les

individus réalisent une tâche de manière plus sûre lorsqu'ils ont à reproduire cette tâche (en suivant un exemple vidéo).

En appliquant le modèle de Rogers et al. (2000) aux SAS, ces dernières doivent permettre d'alerter les conducteurs qu'ils se trouvent dans une position critique sur la voie. La qualité de l'alerte va être dépendante des caractéristiques physiques du signal d'avertissement et de la modalité sensorielle sollicitée. L'encodage et la compréhension seront facilités si l'avertissement renvoie à des significations familières aux conducteurs. L'exécution d'une action faisant suite à l'avertissement sera affectée par les étapes précédentes ; l'avertissement pourra aussi être incitatif. Par exemple, pour un SAS mobilisant la modalité auditive, quatre grandes classes de sons ont été identifiées et testées (McKeown & Isherwood, 2007). Il s'agit d'un son abstrait (ex. : sonorité d'avertissement neutre), d'une icône sonore (ex. : bruit de roulement sur des bandes rugueuses), d'un son provenant de l'environnement mais non spécifique à la situation (ex. : bruit de verres cassés) ou d'un message vocal (ex. : « sortie de route »). Les messages vocaux et les icônes sonores donnent lieu à des temps de réponse plus courts qu'un son provenant de l'environnement mais non spécifique à la situation ou qu'un son abstrait. De même, les messages vocaux et les icônes sonores sont presque toujours identifiés comme des avertissements aux sorties de voie tandis que le taux d'identification est moins élevé pour les deux autres types d'avertissements sonores utilisés.

- **Temporalité des SAS : seuils de déclenchement et progressivité de l'avertissement**

Bien qu'étant l'un des avantages des SAS comparativement aux bandes rugueuses, le seuil de déclenchement de l'avertissement a été peu étudié. Sans surprise, Tijernia et al. (1996) rapportent un nombre d'activations de l'assistance plus important avec des déclenchements précoces qu'avec des déclenchements tardifs. Parallèlement, le déclenchement précoce de l'assistance réduit davantage le nombre de sorties de voie que le déclenchement tardif. Par ailleurs, des résultats obtenus pour d'autres dispositifs d'assistance (système d'avertissement aux collisions frontales)⁵ montrent que les avertissements tardifs tendent à diminuer la confiance qu'ont les conducteurs dans le dispositif, tandis que les avertissements précoces peuvent être perçus comme nuisibles (Abe & Richardson, 2004, 2006). Les avertissements précoces sont également plus efficaces que les avertissements tardifs. L'efficacité globale du dispositif d'assistance dépend du moment de déclenchement de l'assistance. Lee et al. (2002),

⁵ Traduit de l'Anglais « *forward collision warning systems* ». Ces dispositifs ont pour vocation de prévenir les accidents avec le véhicule suivi en avertissant les conducteurs qu'ils se trouvent trop près du véhicule les précédant.

toujours avec des systèmes d'avertissement aux collisions frontales, observent une meilleure efficacité des avertissements précoces par rapport aux avertissements tardifs pour aider les conducteurs à répondre plus rapidement. Qu'ils soient précoces ou tardifs, les avertissements se sont révélés être bénéfiques en comparaison à une condition sans assistance. De manière encore plus générale, la durée du signal d'avertissement a également un effet sur son efficacité. Les avertissements qui durent longtemps sont considérés comme plus valides et donnent lieu à plus de réponses que les avertissements de courte durée et ce, indépendamment de leur niveau de fiabilité (Bliss, Fallon & Nica, 2007).

Le moment de déclenchement de l'avertissement semble être un élément important dans l'efficacité et l'acceptation des SAS. C'est pourquoi, des études ont déjà cherché à optimiser l'algorithme de déclenchement des avertissements de manière à mieux répondre aux besoins des conducteurs. Batavia (1999) propose un algorithme adaptatif capable de prendre en compte la géométrie de la route et les comportements passés des conducteurs. La prise en considération de l'inattention des conducteurs (sommolence et distraction) peut aussi améliorer significativement l'adaptation de l'assistance aux besoins des conducteurs (Fagerberg, 2004).

De manière à encore améliorer l'avertissement fourni par les SAS, des avertissements progressifs ont été imaginés. Dans ce cadre, Rossemeier et al. (2005) ont évalué un système d'avertissement aux sorties de voie à deux niveaux. Un avertissement auditif délivrant un bruit de roulement sur des bandes rugueuses du côté de sortie était fourni dans un premier temps. Si dans les 400 ms suivant le début de ce bruit les conducteurs avaient initié une réponse adéquate, le signal auditif était stoppé. Dans le cas contraire (conducteurs restaient trop près du bord de la voie), l'avertissement de type « bande rugueuse » était déplacé vers le centre de la route et l'avertissement se terminait par un son de cloche. Ce dispositif à deux niveaux a été comparé au même dispositif en ne conservant que le premier niveau d'avertissement, le deuxième niveau (changement de localisation du son de bandes rugueuses et son de cloche) ayant été désactivé. Des temps de réponse plus courts ont été observés avec l'assistance à un seul niveau, mais aucune différence significative n'est apparue en termes de nombre et de taille des sorties de voie en l'assistance à un niveau et celle à deux niveaux. Les questionnaires remplis par les conducteurs à la fin de l'étude ont révélé que l'assistance à deux niveaux était perçue comme trop complexe et intrusive, ce qui rendait cette assistance agaçante et trop alarmante aux yeux des conducteurs. Rimini-döring et al. (2005) ont utilisé l'avertissement à deux niveaux décrit par Rossemeier et al. (2005) sur une population d'individus privés de sommeil et à qui l'on demandait de conduire. Les résultats montrent une diminution du nombre, de la durée et de la taille des sorties de voie, comparativement à une condition sans assistance.

L'efficacité observée avec des SAS peut s'expliquer par des redirections attentionnelles faisant suite aux avertissements. En effet, les avertissements auditifs sont capables d'attirer l'attention des conducteurs dans la direction désirée (Ho & Spence, 2005). Ces résultats ont été recueillis sur simulateur de conduite lorsque les signaux d'avertissement renseignaient du rapprochement rapide entre le véhicule conduit et le véhicule se situant soit devant, soit derrière. Les auteurs en ont conclu qu'un avertissement auditif est très efficace pour capter l'attention des conducteurs. Des résultats similaires ont été rapportés avec l'utilisation d'informations vibro-tactiles (Ho, Tan & Spence, 2005).

- **Modalité sensorielle, latéralisation et redondance sensorielle**

Toutes les études recensées présentent des résultats positifs liés aux SAS. Ces effets bénéfiques sont toutefois modulés en fonction de la localisation de l'avertissement et de la modalité sensorielle utilisée pour le transmettre. Ces deux caractéristiques sont très liées entre elles. Par exemple, si l'assistance agit sur le volant, l'usage de la modalité haptique est une nécessité. Bon nombre d'études ont recours à des SAS fournissant un bruit de passage sur des bandes rugueuses (bruit plus acceptable et générateur de réponses plus rapides que des sons abstraits ; Ziegler, Franke, Renner & Kühnie, 1995)). En conséquence, le son émis est souvent localisé du côté de sortie de voie. Tijernia et al. (1996) rapporte un bénéfice de SAS sollicitant soit la modalité auditive, soit la modalité haptique, en comparaison à une condition sans assistance. La modalité auditive semble moins efficace que la modalité haptique (vibration du volant). Kozak et al. (2006) ont également trouvé qu'une vibration du volant était légèrement plus efficace qu'un avertissement auditif. Des temps de réponse plus courts avec un avertissement haptique (vibration du volant) qu'avec un avertissement auditif ont aussi été enregistrés lorsque les conducteurs n'étaient pas informés de l'introduction des SAS (Suzuki & Jansson, 2003). Cette différence entre dispositifs haptique et auditif disparaissait lorsque les conducteurs étaient informés de la présence du dispositif.

Concernant la latéralisation de l'assistance, Suzuki et Jansson (2003) trouvent des effets similaires pour un SAS auditif directionnel ou non directionnel, à la fois en termes de temps de réponse au volant et d'écart latéral maximum faisant suite à une sortie de voie provoquée. Des interactions complexes entre des avertissements directionnels, et à la fois la modalité sensorielle et la dangerosité de la situation, ont été mise en avant (Tijernia et al., 1996). Cet auteur conclut que les SAS directionnels pourraient être bénéfiques pour les situations hautement dangereuses.

Telle que décrite par Rach et Diederich (2006), l'idée de fournir la même information au même moment via deux modalités sensorielles pour réduire les temps de réponse, a été introduite par Hershenson (1962) et appelée « facilitation inter-sensorielle ». Appliquée au domaine des assistances, la multimodalité (vision et audition) a engendré des bénéfices dans le pilotage d'avion (Helleberg, McLean, Wickens & Goh, 2005). En suivant ce principe de

multimodalité (plus exactement bi-modalité), des SAS ont été développés. Aucun bénéfice en termes d'efficacité n'a été enregistré pour la combinaison d'informations visuelles et haptiques (Kozak et al., 2006). De plus, si l'on se fie à l'évaluation subjective des conducteurs, la combinaison d'informations auditives et haptiques peut être source de surcharge pour les conducteurs (Tijernia et al., 1996).

- **Acceptabilité et confiance**

Des verbalisations post-expérimentales révèlent que les avertissements faisant usage des modalités haptique et auditives sont jugés comme apportant une aide meilleure et sont mieux acceptés qu'un avertissement visuel. Tijernia et al. (1996) recueillent également des avis favorables sur l'utilisation des modalités haptiques et auditives. Les avertissements haptiques sont appréciés, car ils n'alertent pas l'ensemble du véhicule mais simplement son conducteur. De plus, ils sont jugés comme moins distrayants par les conducteurs (Sayer, Sayer & Devonshire, 2005). Avec les SAS reposant sur la modalité auditive (bruit de roulement sur des bandes rugueuses), les conducteurs rapportent comprendre plus facilement la signification du signal (Sayer et al., 2005). De plus, les conducteurs acceptent plus d'avertissements de type « fausse alarme » avec la modalité auditive qu'avec la modalité haptique (Montiglio, Martini & Murdocco, 2006 et données non publiées rapportées par Pohl & Ekmark, 2003). De manière générale, les conducteurs sont peu favorables au concept de SAS. Lorsqu'ils y sont confrontés, les avertissements directionnels sont préférés aux avertissements non-directionnels (Tijernia et al., 1996).

Deux études ont été menées par Rudin-Brown et Noy (2002) de manière à évaluer les possibles aspects négatifs causés par l'utilisation de SAS. Globalement, les auteurs observent une amélioration de l'activité de maintien du véhicule sur sa voie. Indépendamment du niveau de précision du dispositif, les conducteurs s'approchent moins souvent d'un bord de voie avec un SAS que sans. La confiance accordée au dispositif augmente après que les conducteurs aient été confrontés à un avertissement. Cette augmentation est plus importante avec un dispositif précis qu'avec un dispositif imprécis. Ces auteurs ont développé un modèle qualitatif des adaptations comportementales pour les SAS (voir cadre général, partie II.2.2 et figure 9). Ainsi, la personnalité des conducteurs influe sur le développement de la confiance dans le dispositif. Les conducteurs avec des attributions causales externes et peu à la recherche de sensations, ont une plus forte propension à placer beaucoup de confiance dans le SAS et ce, indépendamment de la précision du dispositif. Ces comportements peuvent mener à une sur-confiance dans le dispositif. Les auteurs observent que certains conducteurs se sont reposés sur le dispositif et ont, par conséquent, réalisé des sorties de voie de taille plus importante que les autres conducteurs. Malgré le très faible nombre d'études ayant porté sur l'effet de SAS imprécis, des résultats émanant d'autres dispositifs d'assistance (système d'avertissement aux collisions frontales) sont informatives : les

avertissements incorrects peuvent réduire drastiquement les effets bénéfiques de l'assistance (Bliss & Acton, 2003 ; Enriquez & MacLean, 2004).

- **Un peu plus qu'un simple avertissement ?**

Il existe des SAS qui font plus qu'avertir simplement les conducteurs mais moins que d'agir directement sur le contrôle du véhicule. Il s'agit de dispositifs délivrant un couple au volant (mouvements du volant) indiquant aux conducteurs le sens de la correction à entreprendre. Le dispositif génère donc des à-coups sur le volant du côté du centre de la voie. Ce dispositif a donné des résultats variables, certains conducteurs corrigent la trajectoire de leur véhicule en suivant l'indication fournie par l'assistance. D'autres au contraire, ne suivent pas l'indication fournie et s'y opposent. Ces derniers conducteurs aggravent donc leur position latérale en tournant le volant dans le sens de la sortie de voie (Suzuki & Jansson, 2003). Hoc et al. (2006) rapportent également une forte variabilité inter-individuelle avec l'usage d'une assistance de ce type appelée « mode suggestion d'action ». C'est un dispositif de ce type qui sera au cœur des études de notre première partie expérimentale.

- **Conclusions sur les SAS**

Les dispositifs multimodaux ou à plusieurs niveaux ne semblent pas pouvoir améliorer l'efficacité des SAS. En revanche, les assistances fournissant une information haptique apparaissent prometteuses. Dans le pire des cas, ils sont aussi efficaces et acceptés que les dispositifs reposant sur la modalité auditive.

Même si actuellement il n'y a pas encore de données d'accidentologie sur l'effet de ces SAS, Najm et al. (2002) parlent d'une cible de 459000 accidents (bases de données des États-Unis 1998, incluant les accidents sur route et sur autoroute). Malgré ce large potentiel de réduction d'accidents, tels que conçus actuellement, les SAS sont dépendants du marquage au sol. Ils ne peuvent donc pas être utilisés en l'absence de ce dernier. Par conséquent, en conditions de conduite difficile (présence de brouillard, de neige, de glace ou par temps de forte pluie), alors que les plus forts bénéfices des SAS pourraient être attendus, les SAS ne sont pas toujours en mesure de fonctionner. En effet les caméras vidéo, et plus généralement les capteurs de marquage au sol, sont rendus inopérants par de telles conditions météorologiques.

Pour **synthétiser**, les systèmes d'avertissement aux sorties de voie correspondent à une première catégorie du mode contrôle mutuel dite d'avertissement. Ces dispositifs et les thématiques associées ont été décrits de manière détaillée. Globalement ces dispositifs apparaissent efficaces, à la fois pour réduire le nombre et minimiser la gravité des sorties de voie.

III.4 LES DISPOSITIFS COACTIFS

- **Principe de la catégorie d'assistance**

En termes de dispositifs d'assistance au contrôle latéral en conduite automobile, les dispositifs coactifs correspondent aux assistances nommées « système d'aide au maintien sur la voie » (SAM). Dans ce mode de coopération homme-machine, les conducteurs et les assistances partagent, transitoirement ou en continu, le contrôle de la direction du véhicule. Les conducteurs et l'assistance agissent donc au même moment sur le volant. Actuellement ces dispositifs sont toujours en développement et font l'objet d'études techniques (voir Niibe, Isomoto, Suetomi & Butsuen, 1995 et Shimakage, Satoh, Uenuma & Mouri, 2002 pour des exemples). Peu d'études portant sur la coopération homme-machine sont toutefois disponibles dans la littérature libre d'accès. En termes de niveaux de coopération homme-machine, ces assistances interviennent au niveau de l'action. Il est important de préciser que ce type d'assistance est destiné à aider les conducteurs et non pas à prendre le contrôle du véhicule contre leur volonté. C'est pourquoi, même si une force est appliquée sur le volant par l'assistance, les conducteurs gardent la possibilité d'aller à l'encontre de cette force et donc de passer outre le dispositif.

- **Influence sur les conducteurs**

Hoc et Blosseville (2003) présentent deux types d'assistances développées par le LIVIC agissant transitoirement ou de manière continue sur la trajectoire du véhicule. Il s'agit des assistances limitatives et correctives nommées mode limite et mode correctif par les auteurs. L'assistance corrective applique un couple correctif sur le volant lorsque le véhicule est sur le point de sortir de la voie. Le véhicule est alors ramené automatiquement dans une position sûre lorsque le conducteur se trouve être proche d'une sortie de voie. Cette assistance est déclenchée transitoirement sur la base d'une position latérale devenue dangereuse. La deuxième assistance dont il est question, agit de manière continue. L'assistance limitative entraîne une résistance du volant qui rend plus difficile le fait de tourner le volant en direction de la sortie de voie. Cette résistance augmente à mesure que le véhicule se rapproche d'un bord de voie. A l'heure actuelle, ces deux assistances n'ont pas été testées expérimentalement.

En revanche, l'influence d'autres dispositifs agissant en continu sur la trajectoire du véhicule a été étudiée. Une assistance nommée système d'aide au suivi d'une voie de circulation (LFAS)⁶ destinée aux voies express japonaises a été développée et testée (Tanida, 2000).

⁶ De l'Anglais : « *Lane Following Assistance System* »

L'assistance a été conçue pour détecter l'écart au centre de la voie et appliquer un couple au volant en réponse à cet écart. La force appliquée sur le volant augmente avec l'écart du véhicule au centre de la voie. Avec l'assistance, les conducteurs disent être moins fatigués, avoir moins envie de dormir, et être plus à même de se concentrer après une longue période que sans l'assistance. Après une longue période de conduite, les conducteurs sont toujours capables de réagir aussi vite et précisément à l'apparition d'un stimulus avec l'assistance. Sans l'assistance, ces capacités diminuent.

Un autre dispositif d'assistance qui applique une force continue sur un volant a été installé sur un simulateur de conduite (Steele & Gillespie, 2001). L'idée de cette assistance de type « contrôle partagé » est d'appliquer un couple de force continu sur le volant tendant à replacer le véhicule au centre de la voie de circulation. Ce dispositif requiert une connaissance préalable de la géométrie de la route. L'assistance calcule alors l'angle au volant nécessaire pour suivre convenablement la courbure de la route. Cet angle au volant désiré est alors comparé à l'angle volant choisi par le conducteur. Dans un dernier temps, un couple de force au volant, proportionnel à la différence entre l'angle au volant actuel et l'angle au volant désiré, est généré. Cette assistance haptique, agissant sur le volant, offre de meilleures performances de suivi de voie et permet de réduire les exigences visuelles (d'environ 45%) comparativement à une conduite sans assistance. Les exigences visuelles ont été évaluées au moyen de la méthode d'occlusion visuelle développée par Green (1998). Toutefois, une meilleure disponibilité des capacités cognitives de traitement n'a pas été mise en évidence avec l'ajout d'une tâche secondaire de calcul mental. Les auteurs expliquent ce résultat par une activité de conduite trop facile (conduite en ligne droite avec évitement d'obstacles) et par la méthode utilisée pour évaluer les capacités cognitives de traitement disponibles (tâche de calcul à voix haute).

Une assistance similaire a été utilisée et l'évaluation des activités de guidage, des exigences visuelles et de la disponibilité des capacités cognitives de traitement a été réalisée (Griffiths & Gillespie, 2005). Dans cette étude menée sur simulateur, les conducteurs avaient à suivre leur voie et à éviter les obstacles dont elle était jonchée. Lors des manœuvres d'évitement des obstacles, les comportements des conducteurs étaient similaires avec et sans assistance. Mais entre les obstacles, les erreurs de positionnement latéral (position latérale relative au centre de la route) étaient plus faibles avec l'assistance que sans. Néanmoins, le nombre de collisions enregistrées avec l'assistance est légèrement plus important que celui enregistré sans. Cette différence a été attribuée au fait que le dispositif tend à placer le véhicule au centre de la voie, endroit où se situent les obstacles. Lorsque l'assistance était présente, de moins fortes exigences visuelles étaient requises et une augmentation des capacités cognitives de traitement disponibles était observée.

Honda a développé et commercialisé (modèle Accord) un véhicule équipé d'un SAM conçu pour la conduite sur autoroute. Ce dispositif a été combiné avec un régulateur de vitesse et d'inter-distance. Cette assistance ressemble à une combinaison des assistances avertissement et corrective. Lorsque les conducteurs se rapprochent d'un bord de voie sans faire usage de leur clignotant, l'assistance avertit (avertissement auditif) les conducteurs. Mais en plus de l'avertissement, un couple de force est appliqué sur le volant de manière à tourner doucement le volant vers le centre de la voie. Ce SAM est même capable de négocier certains virages légers sur autoroute, sans que les conducteurs n'aient à actionner le volant. Comme pour les autres dispositifs coactifs, les conducteurs peuvent passer outre le dispositif en tournant simplement le volant. Par exemple, lors de l'évitement d'un obstacle nécessitant un changement de voie et n'offrant pas suffisamment de temps pour actionner le clignotant. Pour être sûr que les conducteurs continuent de se soucier (au moins physiquement) de la position latérale du véhicule, l'assistance détecte la présence des mains sur le volant. Si les conducteurs n'ont pas les mains sur le volant, un avertissement sonore est fourni, dans le cas où les conducteurs continueraient à ne pas tenir le volant, l'assistance se désactive automatiquement.

Pour **synthétiser**, les systèmes d'aide au maintien dans la voie sont des dispositifs de type contrôle mutuel. Les résultats obtenus pour les diverses assistances sont mitigés. Bien qu'Honda équipe déjà l'un des modèles de sa gamme avec un dispositif de cette catégorie, certaines limitations ont été identifiées.

III.5 LA DELEGATION DE FONCTION

III.5.1 *Présentation du régulateur de position latérale*

Le régulateur de position latérale est étudié afin de réduire le nombre de tâches à réaliser par les individus lors de l'activité de conduite. Pour ce faire, l'assistance gère une tâche de conduite habituellement prise en charge par le conducteur. Dans le cas du contrôle latéral, le positionnement du véhicule dans sa voie est délégué au régulateur de position latérale (RPL). Le RPL se substitue aux conducteurs en conditions de conduite normales. Cette substitution est caractéristique de la délégation de fonction (Stanton et al., 2001). Par conséquent, le RPL gère la trajectoire du véhicule sans intervention des conducteurs.

Différents dispositifs d'assistances de type RPL ont été développés (ex. : Chaib, Netto, & Mammar, 2004; Chang, 2004; El Hajjaji & Bentalba, 2003; Moriwaki, 2005; Netto, Labayrade, Iend, Luseti, Blosseville & Mammar, 2003). Du point de vue des conducteurs, ces différents dispositifs sont similaires. Néanmoins, ils diffèrent dans leur principe de fonctionnement. Ainsi, le mode de calcul de la position angulaire à donner au volant et le positionnement cible dans la voie, peuvent varier. Certains dispositifs nécessitent des infrastructures particulières pour être utilisés. Par exemple, un RPL ayant recours à un marquage au sol au

centre de la voie de circulation a été développé (Chang, 2004). Mais, la plupart du temps, les RPL utilisent le marquage au sol existant (ex. : Chaib et al., 2004; Netto et al., 2003).

La figure 13 représente de manière schématique une version simplifiée du mode de fonctionnement d'un RPL. Les conducteurs peuvent choisir d'activer ou de désactiver le dispositif à tout moment (la double flèche pointillée indique cette possibilité sur la figure 13). Lorsque l'assistance est activée, elle gère la position latérale du véhicule en agissant directement sur sa colonne de direction. L'assistance fonctionne alors en autonomie complète sans intervention aucune de la part des conducteurs. Du point de vue des conducteurs, l'assistance prend le contrôle du volant. Les conducteurs ont alors deux possibilités : soit les actions menées par l'assistance leur conviennent, soit au contraire, ce n'est pas le cas. Si les conducteurs sont satisfaits, ils n'exercent aucune force sur le volant et l'assistance continue à fonctionner normalement. Dans le cas opposé, lorsque les conducteurs sont en désaccord avec la gestion du positionnement latéral, il leur suffit alors de tourner le volant afin de désactiver l'assistance et de reprendre en main le contrôle latéral de leur véhicule. Si tel a été le cas, l'assistance n'a plus aucun effet et les conducteurs doivent de nouveau gérer leur position sur la voie (RPL en veille sur la figure 13). Pendant la période où l'assistance est en veille les conducteurs peuvent décider de désactiver l'assistance. Si ce n'est pas le cas, l'assistance reste en veille aussi longtemps que les conducteurs continuent à agir sur le volant. A contrario, s'ils cessent d'agir sur le volant tout en étant sur une voie de circulation, l'assistance est réactivée automatiquement.

Il est important de préciser les limites de validité du système d'assistance utilisé. Ce dernier est en mesure de faire évoluer un véhicule sur une route quel qu'en soit le tracé. En revanche, la conception de cette assistance n'intègre ni la détection d'obstacles sur la chaussée ni, *a fortiori*, leur évitement. Ces tâches incombent donc aux conducteurs qui peuvent être amenés à mettre l'automate en veille lors d'une reprise en main du contrôle latéral.

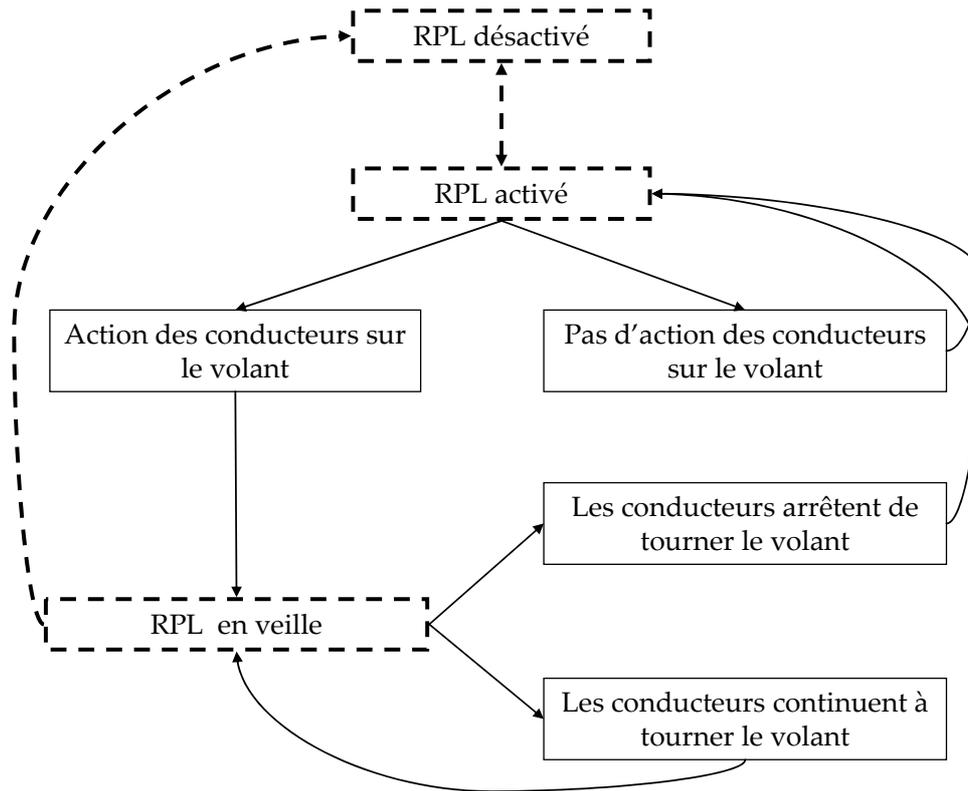


Figure 13. Principe de fonctionnement d'un régulateur de position latérale (RPL) : les trois états possibles et transitions d'un état à l'autre.

III.5.2 Influence du régulateur de position latérale sur les conducteurs

Même si le RPL se substitue aux conducteurs, cette assistance peut être considérée comme une **assistance douce**⁷ (Young & Stanton, 2006). Une protection « douce » se définit par opposition à une protection « dure ». Les assistances basées sur une protection dure ne sont pas destinées à aider les conducteurs mais à corriger leurs erreurs potentielles. En conséquence, lorsque qu'une assistance entreprend une action, cette action est réalisée indépendamment de la volonté des conducteurs. Le RPL se substitue aux conducteurs, mais demeure clairement une assistance « douce » car les conducteurs conservent pleinement l'autorité sur le contrôle du véhicule. Ils peuvent passer outre l'assistance dès qu'ils le jugent nécessaire.

Lorsque qu'un RPL fiable est activé, il garantit l'absence de sorties de voie en conditions de conduite normales et dans les limites d'adhésion du véhicule à la route. Même si le RPL est

⁷ De l'Anglais « soft automation ». La dichotomie entre « soft automation » et « hard automation » (Young & Stanton, 2006) sera respectivement traduite ici par assistance douce et assistance dure.

une technologie récente, ce dispositif est réalisable techniquement et offre une bonne fiabilité. Par exemple, après avoir développé un RPL (Chang 1996a, 1996b), Chang en a réalisé l'évaluation en conditions de conduite réelles (Chang, 2004). Les résultats ont montré que l'utilisation de l'assistance donnait lieu à des trajectoires plus stables que celles de conducteurs expérimentés.

Le fait qu'une partie de l'activité de conduite soit déléguée à une assistance devrait permettre aux conducteurs d'être plus performants dans la réalisation des autres activités qu'ils ont à gérer. Cette assertion est vraie si la quantité de ressources attentionnelles est considérée comme fixe (Wickens, 1984, 1992). Néanmoins, la théorie des ressources attentionnelles malléables (Young & Stanton, 2002) prédit qu'une réduction de la charge mentale (sous-charge) peut mener, via une dégradation attentionnelle, à une diminution générale des performances. L'introduction d'une assistance potentiellement réductrice de la charge mentale ne serait donc pas nécessairement bénéfique. Deux études montrent une réduction de la charge mentale avec l'introduction d'un RPL (Stanton et al., 2001; Young et al., 2002). Mais une autre étude ne montre pas de différences entre une condition de conduite manuelle et une condition de conduite avec un RPL combiné avec un régulateur de vitesse et d'inter-distance (Desmond, Hancock & Monette, 1998).

Hoc et al. (2006), au cours d'une expérience sur piste, ont mis en évidence des **difficultés de reprise en main** lorsque les conducteurs avaient à éviter un obstacle avec un RPL. Les conducteurs avaient à éviter un obstacle placé sur la chaussée ; ils devaient également identifier des logos placés en différents endroits (proximité du point tangent, droit devant visuel, périphérie). Les participants étaient informés du fait que l'assistance utilisée n'était pas destinée à éviter d'éventuels obstacles placés sur la chaussée et que, si tel était le cas, ils devraient prendre en charge l'évitement des obstacles. Les résultats obtenus ont révélé des difficultés de reprise en main du véhicule lors de l'évitement d'obstacles réalisés avec l'assistance. L'amplitude du mouvement de volant produite par les conducteurs pour éviter l'obstacle était plus importante avec l'assistance que sans. De plus, la durée de contournement de l'obstacle s'est avérée être plus courte avec assistance que sans, alors que la vitesse était un peu plus faible. Les conducteurs ont donc réalisé des contournements plus brutaux (amplitude volant plus importante et durée de contournement plus courte) en présence de l'assistance. Les verbalisations spontanées recueillies au cours de l'expérience, dévoilent la difficulté rencontrée par les conducteurs pour se faire une idée de la répartition des fonctions entre eux-mêmes et l'assistance. De plus, les résultats obtenus pour les détections de logos placés sur la piste, ont incité les auteurs à soupçonner une négligence des logos situés à proximité des informations visuelles nécessaires au maintien du contrôle latéral (à proximité du point tangent).

En référence à la théorie de Young et Stanton (2002), la détérioration des performances lors des manœuvres d'évitement, pourrait être liée à une sous-charge mentale résultant de l'automatisation d'une partie de l'activité de maintien dans la voie. Mais Desmond et al. (1998) rapportent également de telles dégradations sans réduction de charge mentale en utilisant une assistance de type RPL combinée avec un régulateur de vitesse et d'inter-distance. L'étude portait sur de longues périodes de conduite (de 9h00 à 13h00 et de 15h00 à 19h00) et s'intéressait donc particulièrement aux conducteurs fatigués. Ces auteurs expliquent leurs résultats par le fait que l'assistance réduit la perception qu'ont les conducteurs fatigués des exigences de la tâche de conduite. En conséquence, les conducteurs fatigués auraient des difficultés à mobiliser leurs efforts lors d'une situation imposant la reprise en main du contrôle. Hoc et al. (2006) apportent une explication proche de celle de Desmond et al. (1998), mais complètement indépendante de la fatigue des conducteurs. Il s'agit de l'apparition du phénomène de contentement (voir cadre général, partie II.2.2). Ce phénomène correspond au désinvestissement des conducteurs de l'activité déléguée. Cette interprétation est appuyée par les soupçons de négligence des informations visuelles nécessaires au maintien du contrôle latéral.

Le RPL pourrait revêtir un intérêt particulier pour certaines portions de route dangereuses comme la traversée de tunnels. Il est même envisageable d'aller encore plus loin dans l'automatisation de la conduite pour ces portions de route particulièrement dangereuses.

Pour **synthétiser**, le mode délégation de fonction est techniquement à même de remplacer efficacement les conducteurs dans la tâche de maintien du véhicule sur une voie de circulation. Néanmoins, lors de la survenue de situations nécessitant une reprise en main du contrôle latéral, les conducteurs semblent éprouver des difficultés.

III.6 L'AUTOMATISATION COMPLETE

L'assistance correspondant au niveau automatisation de la conduite de type mode complètement automatisé n'a été que très peu étudiée. Par conséquent, l'attention qui lui a été portée est très largement inférieure à l'attention portée aux autres catégories d'assistance.

Toujours en ne considérant que le contrôle latéral, une assistance complètement automatisée correspondrait à la délégation complète du contrôle de la trajectoire. Ce niveau d'assistance combinerait le mode délégation de fonction avec un dispositif anticollision. Lors de l'apparition d'un obstacle sur la voie, l'assistance effectuerait la manœuvre d'évitement automatiquement. L'assistance agit alors comme un pilote automatique et les conducteurs n'auraient plus qu'à superviser les actions entreprises par ce pilote automatique. Le risque principal associé à ce niveau d'assistance est que les conducteurs se retrouvent « en dehors

de la boucle » de contrôle (Kaber & Endsley, 1997). Ce phénomène rend la reprise en main du contrôle particulièrement difficile.

Ce niveau d'automatisation, bien que techniquement réalisable actuellement, n'a pas été étudié. Plusieurs raisons peuvent être avancées et l'introduction de cette assistance pose très clairement la question de la répartition de la responsabilité en cas d'accident. En effet, avec une assistance de type pilote automatique, la responsabilité du fabricant pourrait être impliquée en cas de défaillance du dispositif. Cette possible mise en cause du fabricant, particulièrement en cas d'accident, agit comme un frein important à l'étude de tels dispositifs. Par ailleurs, l'absence de réelle formation des conducteurs, en lien avec le fait qu'ils ne soient pas professionnels, constitue une autre raison de l'absence d'études portant sur cette assistance (Hoc et al., sous presse). L'introduction d'un tel dispositif nécessiterait de former les conducteurs à réagir en cas de nécessité.

IV. METHODES D'INVESTIGATION CHOISIES

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes uniquement intéressés à deux des modes d'assistances qui viennent d'être présentés, à savoir les modes contrôle mutuel et délégation de fonction. Bien que conditionné par les dispositifs technologiquement disponibles, ce choix a principalement été guidé par notre intérêt pour l'étude des interférences homme-machine prenant place au niveau de l'action. Par ailleurs, les assistances appartenant au mode contrôle mutuel constituent un enjeu actuel important en ergonomie. De ce point de vue, l'étude de la délégation du contrôle latéral apparaît être plus anticipative. Les effets de ce dispositif sur les conducteurs sont encore assez mal connus et demandent à être étudiés, avant son introduction sur des véhicules disponibles à la vente.

Nos choix méthodologiques ont toujours été motivés par la volonté de ne pas dénaturer l'activité de conduite. Cette dernière est une activité complexe (cf. cadre général, partie 0) dont nous avons souhaité conserver l'essence. En effet, décomposer l'activité (et donc le contexte de production des comportements humains) afin d'en étudier certains attributs, pourrait résulter en l'observation de comportements n'apparaissant que dans le cadre d'un contexte expérimental volontairement réducteur de la complexité de la réalité. Les résultats alors obtenus ne seraient pas transférables à la situation de conduite réelle, dans toute sa complexité. Néanmoins, conserver l'ensemble des facteurs influant sur l'activité de conduite en situation naturelle ne permettrait pas d'avoir un contrôle expérimental suffisamment fort pour pouvoir tirer des conclusions. Lors d'une expérimentation, certains facteurs doivent nécessairement être contrôlés afin de ne pas interférer avec les facteurs testés. Par conséquent, les choix opérés sont le fruit d'un compromis entre la validité dite écologique des résultats (résultats valides en situation de conduite réelle) et le contrôle expérimental nécessaire à l'obtention de résultats expérimentaux (Hoc, 2001b).

L'objectif de cette partie sur les méthodes d'investigations est de présenter les choix méthodologiques qui ont été faits pour étudier expérimentalement les modes d'assistance contrôle mutuel et délégation de fonction. Dans un premier temps, seront abordés les moyens d'études expérimentaux permettant l'analyse d'assistances à la conduite automobile existants. L'objectif ici est de déterminer quel contexte expérimental est le plus adapté à l'évaluation des assistances considérées dans cette thèse. Dans un deuxième temps, seront présentées les conditions expérimentales dans lesquelles les assistances ont été évaluées. Finalement, les méthodes utilisées pour évaluer les assistances seront présentées dans leurs grandes lignes.

IV.1 LES MOYENS D'ETUDES EXPERIMENTAUX : SIMULATION DE CONDUITE OU CONDUITE REELLE ?

Divers moyens d'études expérimentaux sont aujourd'hui disponibles. Ces moyens vont de la conduite réelle sur route à l'utilisation de séquences vidéo, en passant par les simulateurs de conduite. Les études portant sur la coopération homme-machine ont très souvent recours soit au simulateur de conduite, soit à l'utilisation de véhicules réels. Intuitivement, l'usage de véhicules réels pour étudier les comportements automobiles semble être l'outil expérimental le plus pertinent. Une analyse plus détaillée montre que le recours à une expérimentation en conditions réelles de conduite, n'est pas nécessairement le moyen le plus adapté aux besoins de l'expérimentateur. Parfois, l'usage de séquences vidéos pré-enregistrées peut se révéler mieux adapté à l'objet d'étude que la simulation ou la conduite réelle. Par exemple, Milleville-Pennel et Mahé (2006) ont eu recours à ce moyen dans le cadre de la prévention des sorties de voies via l'étude des informations visuelles nécessaires au maintien du contrôle latéral. Les participants regardaient une vidéo qu'il leur était demandé d'arrêter lorsqu'ils le jugeaient nécessaire. Des dérives latérales (vers le bord de route), plus ou moins rapides, étaient imposées aux conducteurs afin de déterminer sur la base de quelles informations visuelles ils arrêtaient la vidéo. Cette étude nécessitait un contrôle expérimental très précis de la dérive latérale du véhicule, l'enregistrement précis de la position oculaire des participants et ceci, dans une scène visuelle identique pour tous les participants. Au regard de ces éléments, il est apparu que le moyen d'étude le plus approprié était l'utilisation de séquences vidéos projetées sur grand écran.

En bref, il est impossible de désigner le meilleur moyen d'étude expérimental dans l'absolu. Le meilleur moyen d'étude est celui qui répond le mieux aux besoins de l'étude considérée. Toutefois, dans cette partie nous nous sommes intéressés aux deux moyens d'étude mettant les participants en situation de conduite. Situation de conduite signifie ici que les conducteurs, via leurs actions (sur un volant et un pédalier), vont modifier leur position dans un environnement réel ou simulé.

IV.1.1 Conduite sur véhicules réels

Dans cette situation, le véhicule est équipé de divers appareillages permettant d'enregistrer (avec plus ou moins de précision) certaines caractéristiques du véhicule et les comportements des conducteurs. Les données minimales recueillies sont la vitesse du véhicule et sa position sur la route. D'autres données et informations sur les conducteurs, tels qu'une analyse des stratégies visuelles, peuvent y être ajoutées. Les véhicules équipés sont souvent choisis car ils offrent la plus grande validité externe (Nilsson, 1993). Ainsi, les résultats obtenus lors d'une étude sur véhicule équipé seraient plus facilement généralisables à la situation de conduite naturelle. Pour les expérimentations portant sur les assistances à la conduite, les conducteurs sont souvent placés dans des situations peu fréquentes et parfois critiques. Par exemple, lors d'expérimentations portant sur des dispositifs anti-collisions, les conducteurs pourraient être placés dans des conditions de collision imminentes avec un véhicule les précédents. Les conducteurs seraient donc exposés à des situations présentant un fort risque d'accident entre les deux véhicules. Par conséquent, de telles expérimentations ne peuvent être réalisées avant d'avoir obtenu des garanties sur l'efficacité du dispositif considéré et sur ses effets sur les conducteurs.

Au cours de l'expérimentation, les conducteurs sont plongés dans les conditions de conduites naturelles auxquelles ils sont confrontés quotidiennement. Néanmoins, l'utilisation d'un véhicule équipé entraîne des difficultés de standardisation des conditions de recueil des données, notamment le trafic, les conditions météorologiques, les modifications de luminosité, la variabilité à l'abord de certaines parties de l'infrastructure, etc. Les données obtenues sur des véhicules réels sont également plus bruitées (signaux parasites venant s'ajouter aux signaux d'intérêt), de par l'imprécision des capteurs, les vibrations du véhicules, la présence de nombreux équipements embarqués dans le véhicule etc. Les résultats obtenus sont alors plus difficilement exploitables. Des coûts financiers importants et le risque d'accidents (pour les participants, mais aussi pour les autres usagers), sont également à prendre en considération lors d'études sur véhicules réels.

Certains de ces désavantages peuvent être réduits en utilisant une piste d'essai à la place de la voirie publique. Le contexte expérimental est alors moins naturel (réduction de la validité écologique du véhicule d'essai) que celui de la voirie publique, mais un gain sécuritaire et une meilleure maîtrise des conditions de trafic sont possibles.

IV.1.2 Conduite sur simulateur

Le développement récent des techniques de réalité virtuelle permet de simuler une situation de conduite automobile. Mestre (2004) retient deux aspects essentiels de la définition de réalité virtuelle proposée par Fuchs, Moreau et Papin (2001), dans le traité de la réalité virtuelle. Premièrement, la situation de réalité virtuelle est immersive, c'est-à-dire qu'elle

cherche à donner les sensations à l'individu que l'environnement dans lequel il se trouve est réel et qu'il se trouve lui-même dans ce monde. Deuxièmement, l'individu peut entrer en interaction avec le monde virtuel et donc manipuler des objets présents dans le monde virtuel. Les simulateurs de conduite automobile sont une illustration de la réalité virtuelle.

Il existe une grande variété de simulateurs de conduite automobile produits par différents organismes. Ces simulateurs sont classables en deux grandes catégories : les simulateurs à base fixe et les simulateurs à base mobile (Figure 14 pour deux exemples). Les simulateurs à base fixe sont des habitacles de véhicules (réels ou créés spécialement) qui ne se déplacent pas physiquement. Dans ce cas, et à l'inverse de ce qui se produit en conduite réelle, le véhicule conduit (simulateur) ne se déplace pas dans son environnement ; c'est l'environnement qui se déplace relativement au simulateur. Un ou plusieurs écrans (d'ordinateurs ou vidéo-projetés) de dimensions variables sont alors utilisés pour donner l'illusion aux conducteurs de se déplacer dans l'environnement. L'évolution des informations visuelles relatives au déplacement du véhicule virtuel dans son environnement est générée par les actions des conducteurs sur le volant et sur le pédalier. Ces deux éléments du simulateur fournissent des informations haptiques aux conducteurs afin de restituer des sensations de conduite ordinaire. Pour mieux immerger les individus dans le monde virtuel, des informations auditives sur le véhicule conduit et sur son environnement sont ajoutées. Ainsi, le bruit du moteur diffère en fonction du rapport de vitesse choisi et de la pression exercée sur la pédale d'accélérateur. De même, lorsque le véhicule conduit croise un élément (fixe ou mobile) de l'environnement, un son relatif à cette situation est associé. Les simulateurs à base mobile sont composés d'un véhicule placé sur une plate-forme mobile à six degrés de liberté. En plus des attributs d'un simulateur à base fixe, le simulateur à base mobile offre des informations haptiques supplémentaires et des informations vestibulaires (sur les déplacements du corps) aux conducteurs. L'immersion dans le monde virtuel autorisée par ces simulateurs est encore plus importante qu'avec un simulateur à base fixe. Sur le simulateur à base mobile de la figure 14, l'habitacle se situe dans la cabine blanche et des rails ont été ajoutés pour permettre de restituer de plus fortes accélérations latérales comme longitudinales.

Les simulateurs de conduite présentent de nombreux avantages pour l'évaluation des assistances à la conduite. Comparativement aux études sur véhicules équipés, un avantage majeur des simulateurs est qu'ils permettent de choisir et de maintenir constantes les conditions de conduite. Ainsi, tous les participants d'une étude peuvent être exposés à des conditions identiques. Cette caractéristique rend les simulateurs particulièrement adaptés aux études comparatives où un seul facteur est manipulé tandis que les autres sont maintenus constants. Un autre avantage majeur des simulateurs de conduite est qu'ils permettent d'exposer les conducteurs à des situations « à risques », sans pour autant poser de problèmes de sécurité.

De manière à pouvoir généraliser les résultats obtenus sur simulateur de conduite, il convient d'avoir vérifié leur validité au préalable (Kemeny & Panerai, 2003). En effet, si le simulateur place les individus dans un environnement virtuel qui est très différent de l'environnement de conduite naturel, la validité écologique des études menées sur ce simulateur sera très faible. Autrement dit, les résultats obtenus sur ce simulateur ne seront que faiblement transférables à une situation de conduite réelle. Il est donc nécessaire de mettre en adéquation les besoins expérimentaux avec les objectifs et les méthodes d'investigation utilisées. La validité écologique de l'étude dépend de cette adéquation (Hoc, 2001b). Dans une revue des études portant sur la validation de simulateurs, Kaptein, Theeuwes et Van der Horst (1996) ont montré une certaine limitation des simulateurs pour évaluer les comportements des conducteurs. De manière générale, les simulateurs ont une bonne validité relative mais une faible validité absolue. La validité absolue renvoie à la correspondance numérique entre les données comportementales recueillies sur simulateur et celles recueillies sur véhicule équipé. La validité relative, quant à elle, renvoie à la direction ou à la taille relative des effets observés entre simulateur et véhicule réel. Par exemple, Blana et Golias (1999) rapportent des vitesses de conduites généralement plus élevées et une variabilité de la position sur la voie plus importante avec un simulateur à base fixe qu'en conduite réelle. Néanmoins, les effets expérimentaux observés allaient dans la même direction sur véhicule réel et sur simulateur.

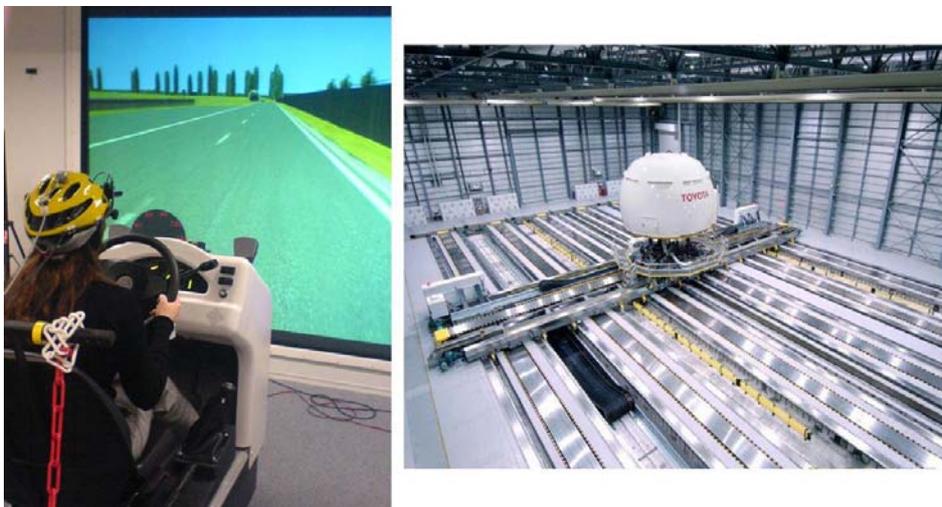


Figure 14. Deux exemples de simulateurs de conduite. A gauche un simulateur à base fixe développé par l'INRETS⁸, à droite un simulateur à base mobile développé par Toyota (source : www.caradvice.com.au).

⁸ INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

IV.1.3 Comparatif entre la conduite sur simulateur et la conduite réelle

Bengler (1995) propose une synthèse des avantages et inconvénients de la réalisation d'une étude sur véhicule équipé ou sur simulateur de conduite (Tableau 10).

Tableau 10. Synthèse de la comparaison entre les études sur véhicules équipés et sur simulateur. (Bengler, 1995)

	Véhicule équipé	Simulateur
Détail de l'environnement	++	++
Trafic	++	++
Standardisation	--	++
Mesures	+/-	++
Coût	-	++
Temps nécessaire	--	-
Sécurité	--	++
Flexibilité	--	--
Modèle véhicule	++	-
Réactivité	++	-
Angle visuel	++	--

Les simulateurs de conduite apparaissent comme des outils expérimentaux pertinents à l'étude des comportements humains, dans la mesure où l'intérêt de l'étude ne porte pas sur des informations sensorielles qui ne sont pas présentes lors de la simulation (Simon, 2005). Il serait par exemple peu pertinent d'étudier l'implication des accélérations latérales lors de la négociation de virages sur un simulateur à base fixe.

L'ensemble des études expérimentales entreprises lors de cette thèse ont été réalisées sur simulateur de conduite (à base fixe et à base mobile). Les raisons principales qui ont conduit notre choix sont la sécurité offerte par les études sur simulateurs, les possibilités de standardisation qu'ils offrent et la qualité des données recueillies. L'évaluation d'assistances au contrôle latéral nécessitait de placer les conducteurs dans des situations critiques (sortie de voie imminente) qui soient le plus reproductibles possible, afin de comparer les assistances entre elles. Les comparaisons entre assistances demandent également une bonne précision de mesure.

Dans une perspective ergonomique applicative, il paraît logique d'étudier les effets d'assistances en conduite réelle chez beaucoup de personnes et pendant une longue période de temps. En d'autres termes, avant de commercialiser une nouvelle assistance, il semble raisonnable de mener une évaluation sur des véhicules réels. Toutefois, dans le cadre qui nous concerne (celui de la psychologie ergonomique), même si une certaine validité externe et particulièrement écologique est recherchée, l'objectif de nos études n'est pas simplement de valider les performances d'assistances. Nous souhaitons également mieux comprendre les mécanismes de coopération homme-machine, et particulièrement ceux prenant place au niveau subsymbolique introduits avec les assistances.

En conséquence, du point de vue des constructeurs automobiles, nos études se situent au début du processus de validation, avant que d'autres études impliquant beaucoup de participants sur des longues périodes de temps ne viennent clôturer la démarche. Du point de vue de la recherche en psychologie cognitive en revanche, nos études se situent au plus près des domaines d'application.

IV.2 LES CONDITIONS D'ÉVALUATION DES ASSISTANCES

Les études entreprises pour cette thèse portent sur l'évaluation d'assistances au contrôle latéral. Les trois expérimentations présentées ont nécessité de placer les conducteurs dans une situation dite critique. Pour les systèmes d'avertissement aux sorties de voie appartenant au mode contrôle mutuel, les conducteurs étaient placés dans une situation proche de la sortie de voie. Pour l'étude portant sur le mode délégation de fonction, avec l'utilisation d'un régulateur de position latérale, les conducteurs avaient à faire face à des contournements d'obstacles pour lesquels l'assistance était invalide. L'utilisation de ces situations critiques était une nécessité pour tester l'efficacité des SAS d'une part, et pour observer les comportements des conducteurs lors d'une situation impliquant la reprise en main du contrôle en cours d'utilisation d'un régulateur de position latérale d'autre part.

Pour les SAS, les situations critiques ont été générées soit par l'occlusion de la scène visuelle, soit par une tâche secondaire détournant les conducteurs de leur activité de conduite. Ces situations critiques sont artificielles et ne mettent pas les conducteurs en situation de sortie naturelle. Cependant, cette méthode a été choisie car c'est celle qui autorise la plus grande reproductibilité des situations critiques. L'expérimentateur détermine le lieu d'apparition des occlusions visuelles ou des tâches secondaires, puis modifie la trajectoire du véhicule à l'insu des conducteurs, de sorte à provoquer une sortie de voie du côté désiré.

Pour le régulateur de position latérale, les situations critiques provoquées sont en revanche similaires à celles rencontrées en situation de conduite naturelle. La présence d'un obstacle sur la voie de circulation que l'assistance n'est pas capable d'éviter, implique la reprise en main du véhicule par les conducteurs.

IV.3 LES METHODES D'EVALUATION DES ASSISTANCES

Afin d'appréhender au mieux les comportements des conducteurs en condition de conduite, et particulièrement lors des situations critiques, l'efficacité des différents dispositifs a été évaluée. L'efficacité des assistances constitue donc notre principal intérêt, mais nous avons également considéré d'autres effets introduits par les assistances. Ainsi, dans l'une de nos études en particulier, nous nous sommes intéressés à l'acceptabilité des assistances.

L'efficacité se définit comme la quantité de bénéfices produits par une assistance donnée en rapport à la même situation expérimentale, mais sans assistance ou avec une autre assistance. L'étude de l'efficacité que nous avons menée repose essentiellement sur l'analyse des actions des conducteurs sur les commandes du véhicule lors de l'apparition de situations critiques. Cette analyse a parfois été étendue aux situations de conduite sans survenue de situations critiques. Par ailleurs, les stratégies visuelles des conducteurs ont été étudiées lors de l'expérimentation impliquant le régulateur de position latérale. Ces analyses renvoient à l'évaluation de l'efficacité des dispositifs d'assistance, dans la mesure où nous avons cherché à déterminer des changements dans les stratégies de prise d'information visuelles en présence de l'assistance.

Une analyse de **l'acceptabilité** des assistances est nécessaire car elle est déterminante de l'utilisation ou non de l'assistance considérée. Les définitions de l'acceptabilité sont très variables selon les chercheurs et leur objet d'étude. Généralement, les utilisateurs doivent faire part de leur avis sur la facilité et le confort d'utilisation du dispositif évalué. Ils leur est souvent demandé s'ils seraient prêts à acheter le dispositif et, si oui, quelle somme ils seraient prêts à déboursier (ex. : Tijernia et al., 1995). De même, l'utilité perçue des dispositifs est souvent évaluée en termes de sécurité, de confort et d'efficacité. En relation aux aspects de l'acceptabilité abordés, il existe une large variété de techniques pour évaluer l'acceptabilité d'assistances à la conduite. Quatre grandes catégories de techniques ont été répertoriées (Comte, Wardman & Whelan, 2000). Il s'agit des groupes d'intérêts, de l'établissement d'un classement parmi les dispositifs expérimentés, de l'administration de questionnaires sur l'attitude des conducteurs vis-à-vis du dispositif d'assistance et des études de terrain. Ces différentes méthodologies répondent à des objectifs différents et offrent des points de vue différents sur l'acceptabilité des dispositifs considérés. Dans le cadre d'une étude portant sur les SAS, nous avons fait usage des groupes d'intérêt et de l'établissement d'un classement des dispositifs par les conducteurs. Le groupe d'intérêt consiste à se limiter à un faible nombre de participants mais à y consacrer une longue période de temps aux travers d'entretiens ; et ce afin d'avoir une discussion approfondie avec les participants. Il s'agit d'une méthode exploratoire qui permet de cibler l'ensemble des thèmes (et de générer des hypothèses) qui mériteraient d'être investigués sur de plus larges échantillons de participants. Un classement par ordre de préférence des assistances évaluées a également été

utilisé. Cette technique permet l'évaluation comparée d'une variété de dispositifs. Nos objectifs concernant l'acceptabilité étaient donc de comparer différentes assistances entre elles et de chercher quelques pistes explicatives des éventuelles différences observées.

PARTIE EXPÉRIMENTALE 1 : APPORTS DES SYSTEMES D'AVERTISSEMENTS AUX SORTIES DE VOIE : AVERTISSEMENTS SIMPLES ET AMORÇAGE MOTEUR

I. INTRODUCTION

Les systèmes d'avertissement aux sorties de voie (SAS) entrent en interférence avec les conducteurs au cours de l'activité de conduite. L'intervention de ces dispositifs n'est pas continue. Au contraire, elle survient en réponse à un comportement, jugé non conforme au maintien du véhicule dans sa voie. Un jugement, opéré sur la base de critères prédéterminés, est donc transmis aux conducteurs afin de les avertir d'un positionnement latéral devenu dangereux. L'avertissement délivré incite les conducteurs, à réagir à la situation dans laquelle ils se trouvent. La réaction appropriée, lorsque le véhicule se trouve en position de sortie de voie, consiste à agir sur le volant afin de replacer le véhicule dans une position sûre. Le dispositif d'assistance agit comme pourrait le faire un passager du véhicule qui serait attentif au bon déroulement de l'activité de guidage et avertirait le conducteur en cas de sortie de voie imminente. Cette situation coopérative correspond au mode de coopération dit de contrôle mutuel (Hoc et al., sous presse).

Le contrôle mutuel est un mode de coopération impliqué de fait dans le pilotage d'avion, de par la présence d'un pilote et d'un copilote tout deux en charge de l'activité de pilotage. Dans le cadre des assistances au contrôle latéral en conduite automobile, il s'agit d'un mode de coopération sur lequel chercheurs et constructeurs automobile concentrent leurs efforts actuellement. Le correcteur électronique de trajectoire, premier dispositif d'aide au contrôle de la trajectoire, a été conçu de manière à limiter drastiquement ces interférences homme-machine (cf. cadre général, partie 0). Son action a donc été dirigée vers une amélioration du comportement dynamique du véhicule. Désormais, il apparaît difficile de développer de nouvelles assistances au contrôle latéral, sans pour autant générer d'interférences homme-machine. L'apparition de ces interférences, qu'il convient de vérifier de manière à évaluer l'efficacité de l'assistance, offre également un cadre propice à l'étude de la coopération homme-machine.

Les systèmes d'avertissement aux sorties de voie sont destinés à améliorer le diagnostic de la situation sans intervenir directement sur le contrôle de la trajectoire du véhicule (Kovordányi, Ohlsson & Alm, 2005). Les SAS ne modifient pas la trajectoire du véhicule par une action physique sur le contrôle de la trajectoire. Ces assistances fournissent simplement des informations sur l'état de l'environnement, dans lequel se trouvent les conducteurs, de

manière à faciliter leur analyse de la situation. Cette analyse de la situation de conduite correspond à ce que nous nommons « diagnostic de la situation ». Le diagnostic de la situation renvoie aux activités de traitement symbolique des informations, y compris fournies par l'assistance, disponibles dans l'environnement à un moment donné.

Les systèmes d'aide au maintien dans la voie (SAM) interviennent directement au niveau de l'action. Avec ce mode d'assistance, les actions entreprises par un des agents de l'équipe, influencent directement celles prises par l'autre agent (Kovordányi et al., 2005). Le dispositif d'assistance et le conducteur partagent, au moins transitoirement, le contrôle de la trajectoire. Ainsi, les deux agents de l'équipe homme-machine agissent ensemble sur l'organe de contrôle de la trajectoire du véhicule qu'est le volant.

Chacune de ces deux sous-catégories du mode contrôle mutuel présente des avantages et des inconvénients. Les SAS sont bénéfiques car ils permettent d'avertir les conducteurs à l'approche d'une sortie de voie. De plus, les conducteurs restent les seuls à agir sur le volant évitant ainsi la participation directe de l'assistance au contrôle de la trajectoire. En revanche les informations fournies par ces assistances sont de nature symbolique et par conséquent nécessitent un temps de traitement important. À l'inverse, les SAM contribuent activement à la tâche de guidage latéral en agissant directement sur le volant. Le véhicule est alors redirigé, constamment ou transitoirement selon les dispositifs, vers le centre de la voie de circulation. La difficulté principale à laquelle est confronté ce type d'assistance est de faire en sorte que les actions du dispositif et celles du conducteur s'entremêlent convenablement, de manière à éviter des réactions inadaptées des conducteurs.

Dans cette première partie expérimentale, nous nous sommes particulièrement intéressés à une nouvelle assistance se situant à la frontière entre les SAS et les SAM. Cette assistance délivre un avertissement aux conducteurs, tout en ayant pour objectif d'intervenir au niveau de l'action. Pour cela, l'assistance intervient via une action sur le volant, organe du véhicule permettant aux conducteurs de gérer leur trajectoire. L'intervention de l'assistance prend la forme de mouvements de volant de faible amplitude, qui n'affectent que très marginalement la trajectoire du véhicule. L'effet attendu de l'assistance n'est donc pas une correction mécanique de la trajectoire du véhicule, mais plutôt de favoriser la correction de trajectoire opérée par les conducteurs. Les conducteurs restent ainsi les seuls à agir véritablement sur la trajectoire du véhicule. Compte tenu de son caractère clairement avertisseur et de son influence directe minimale sur la trajectoire, cette assistance appartient correspond plus à un dispositif SAS qu'à un dispositif SAM.

L'assistance est déclenchée lorsque le véhicule se trouve être proche d'une situation de sortie de voie. Un couple de force appliqué sur la colonne de direction entraîne alors une oscillation du volant. Aussi longtemps que le véhicule reste dans une position jugée dangereuse sur la chaussée, le volant va réaliser des mouvements de va-et-vient. Ces

oscillations ne sont pas symétriques, comme pourraient l'être celles d'une simple vibration du volant. Au contraire, le couple de force engendrant un mouvement du volant vers le centre de la route est plus grand que celui entraînant un mouvement de volant de l'autre côté. De plus, le premier coup de volant est systématiquement orienté vers le centre de la voie.

La figure 15 représente un exemple de déclenchement de cette assistance pour une sortie de voie à droite imminente, lorsqu'aucune autre force n'est appliquée sur le volant (exemple théorique où les mains du conducteur ne seraient pas posées sur le volant). Le premier mouvement de volant est donc orienté vers la gauche, c'est-à-dire vers le centre de la voie. Cette première force générée par l'assistance entraîne une faible modification angulaire de la position du volant (6°). Dans l'exemple de la figure 15 et si l'on considère que le volant se trouvait être dans une position angulaire initiale de 0° , le volant se trouve alors dans une position angulaire de -6° , ce qui correspond à une rotation de 6° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Les tailles des oscillations angulaires produites par le dispositif ont été volontairement amplifiées sur la figure, de manière à mieux rendre compte visuellement des actions produites par l'assistance. Suite à cette première oscillation, une seconde de sens opposé (dans le sens des aiguilles d'une montre) d'une amplitude de 3.2° était délivrée. La période du signal (du début d'une l'oscillation vers le centre de la voie au début de la suivante) est de 300 millisecondes.

En l'absence totale de force exercée sur le volant, le caractère asymétrique du signal de commande transmis à la colonne de direction entraînerait une déviation de la trajectoire du véhicule en direction du centre de la voie. En fonction de la façon dont les conducteurs tiennent leur volant et donc de la force qu'ils appliquent sur ce dernier, le mouvement résultant du signal de commande envoyé au moteur de direction est modifié. En effet, tel qu'il a été conçu, le dispositif d'assistance délivre un couple de force donné et ne prend pas en compte la résistance offerte par les conducteurs, systématique dès lors que les mains sont posées sur le volant. En d'autres termes, le dispositif ne contrôle pas les effets qu'il produit au niveau du volant et délivre toujours les mêmes couples de force, indépendamment des actions entreprises par les conducteurs. En situation de conduite, les oscillations effectives du volant sont amorties par les forces appliquées sur le volant (poids des mains et force exercées pour mener à bien l'activité de guidage), ce qui réduit d'autant plus son influence mécanique sur la trajectoire.

Les amplitudes et durées des mouvements de volant générés par les assistances sont paramétrables par les expérimentateurs selon certaines variables dépendantes du dispositif particulier considéré. Deux dispositifs identiques dans leur principe, mais différents dans leur conception, ont été utilisés pour les deux études de la partie expérimentale 1. Les mouvements de volant générés par l'un (celui utilisé dans la première étude) étaient

paramétrables en amplitude et en durée. Ceux produits par le second étaient paramétrables en couple de force appliqués sur la colonne de direction du véhicule. Les valeurs présentées dans l'exemple précédent correspondent à celles utilisées dans la première expérimentation de cette première partie expérimentale.

L'idée de ce dispositif d'assistance est née d'une collaboration entre l'équipe PsyCoTec⁹ et le LIVIC dans le cadre du projet national ARCOS¹⁰. Franck Mars a défini le principe d'action du dispositif et a réalisé sa mise en œuvre initiale, conjointement avec Benoît Lusetti, sur un des véhicules du LIVIC.

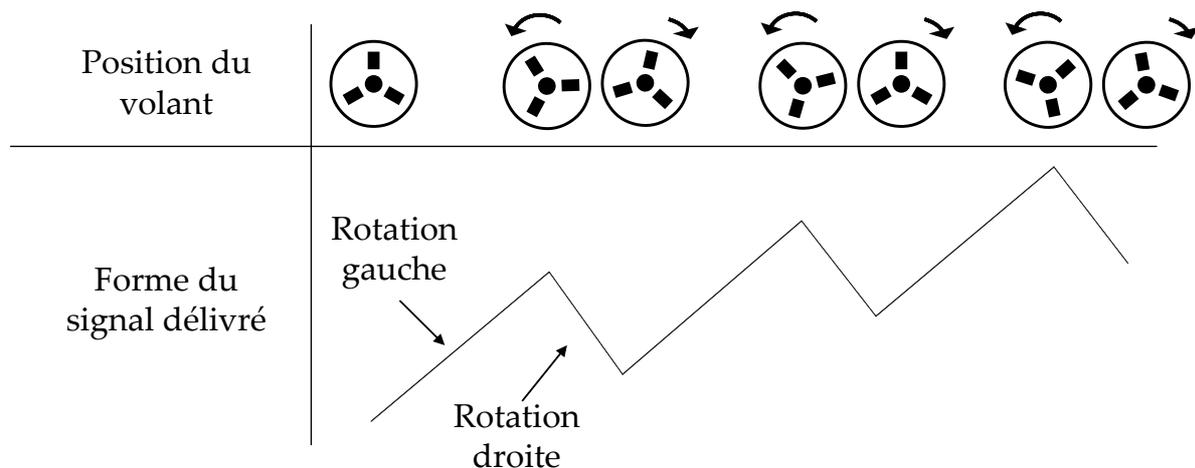


Figure 15. Principe de fonctionnement de l'assistance amorçage moteur.

Exemple théorique d'une sortie de voie à droite, en l'absence de force appliquée sur le volant.

Les amplitudes des oscillations ont volontairement été exagérées sur la figure.

Nous avons nommé cette assistance « **amorçage moteur** » (AM) car elle a été imaginée pour être une initiation motrice du mouvement de volant à réaliser. La vibration du volant agit comme un avertissement classique aux conducteurs. L'amorçage moteur est donc un SAS comme les autres, qui agit selon les étapes du processus décrit par Rogers et al. (2000). Néanmoins, le premier coup de volant et ceux qui suivent dans la même direction, en plus de fournir une information symbolique (avertissement), fournirait une information subsymbolique aux conducteurs. Les conducteurs seraient alors incités, d'un point de vue moteur, à suivre le mouvement généré par l'assistance. Cette assistance, de par son

⁹ Équipe de recherche « Psychologie, Cognition, technologie »

¹⁰ Action de Recherche pour une COnduite Sécurisée

indication motrice (sens de la correction à réaliser), est de nature à intervenir directement au niveau du contrôle sensori-moteur de l'activité.

Un dispositif au principe d'action similaire a déjà été évalué par Suzuki et Jansson (2003). Ils ont comparé diverses assistances de type SAS utilisant à la fois les modalités auditive et haptique. Parmi les différentes assistances étudiées, l'une d'entre elles, décrite comme un couple de force appliqué sur le volant, consistait à délivrer des impulsions au volant (signal de commande de forme rectangulaire, figure 16). Lorsque les conducteurs n'étaient pas informés de la présence de l'assistance, la moitié des participants de l'étude suivaient la direction délivrée par le dispositif, tandis que l'autre moitié des participants contraient le dispositif. Ces derniers entreprenaient donc un mouvement de volant précipitant le véhicule du côté de sortie de voie. Dans un deuxième temps, les conducteurs rectifiaient correctement la trajectoire du véhicule. La proportion de participants contrant le dispositif était réduite de moitié lorsque les conducteurs étaient prévenus à l'avance de la présence du dispositif d'assistance. Ces résultats semblent indiquer deux éléments importants. Premièrement, le signal délivré par l'assistance agit au niveau de l'action et donc du contrôle sensori-moteur de l'activité. En effet, les réactions des conducteurs consistant à contrer le dispositif d'assistance indiquent que le diagnostic de la situation dans laquelle se trouvent les conducteurs n'a pas été réalisé au moment de la première réponse au volant. Si tel avait été le cas, la moitié (ou le quart) des conducteurs n'auraient pas entrepris une action au volant aggravant leur sortie de voie. Au contraire, les corrections apparaissant dans un deuxième temps (après que les conducteurs aient contré le dispositif), indiquent la fin du diagnostic de la situation. Cela signifie que les conducteurs ont pris en considération les éléments de l'environnement leur permettant de corriger correctement la trajectoire de leur véhicule. Par conséquent, l'intervention du dispositif au niveau de l'action ne semble pas nuire à un diagnostic de la situation réalisé de manière concomitante. Le diagnostic de la situation nécessite simplement une période de temps plus importante que l'intervention au niveau de l'action. Deuxièmement, le fait que certains conducteurs aient contré le dispositif indique que le signal fourni par le dispositif n'a pas toujours été bien interprété au niveau sensori-moteur. Suzuki et Jansson (2003) expliquent ce résultat par l'assimilation du signal délivré par l'assistance à certaines conditions naturelles entraînant une modification brutale de la trajectoire du véhicule. La situation d'une rafale de vent latérale déviant le véhicule de sa trajectoire en est une bonne illustration. Hoc et al. (2006), lors de la réalisation d'une étude sur piste d'essai, rapportent également une forte variabilité inter-individuelle avec l'usage d'une première mise en œuvre de l'amorçage moteur, appelée alors « suggestion d'action ». Ces études indiquent qu'agir au niveau de l'action provoque probablement des réponses plus immédiates que d'agir au niveau du diagnostic de la situation. Cependant, la forme et la force de l'amorce motrice sont très importantes. De manière à ne pas créer d'interférences négatives le choix d'un signal bien calibré semble être crucial.

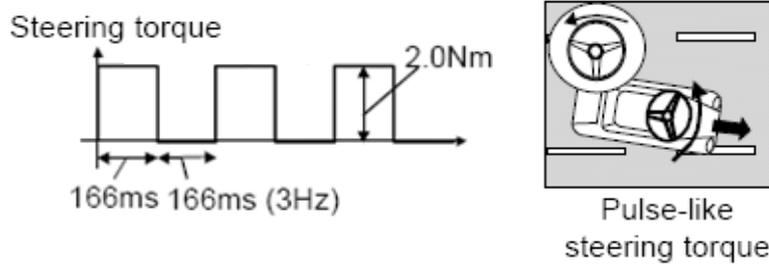


Figure 16. Forme et force du signal délivré par Suzuki et Jansson pour l'exemple d'une sortie à droite. D'après Suzuki & Jansson (2003).

Dans un premier temps, l'objectif de la première partie expérimentale était d'évaluer expérimentalement le concept d'amorçage moteur. Pour ce faire, une comparaison de l'efficacité de l'amorçage moteur avec des assistances de type SAS plus traditionnelles a été choisie. Dans un deuxième temps, nous avons souhaité mieux comprendre le mécanisme de fonctionnement de l'amorçage moteur. Dans un troisième et dernier temps, nous souhaitions aborder l'évaluation de l'acceptabilité de ce dispositif d'assistance en rapport aux autres SAS.

Comme introduit dans la partie I.2.5 du cadre général, présenter la même information sensorielle (de type avertissement) via deux modalités sensorielles différentes peut améliorer les performances des individus. Ce concept de facilitation sensorielle introduit par Hershenson (1962) a été obtenu en termes de temps de réponse des individus. Ho et al. (2006) dans une étude sur simulateur destinée à évaluer diverses assistances anti-collisions longitudinales (avec le véhicule précédant le véhicule conduit) rapportent des résultats où la combinaison des modalités auditive et vibro-tactile s'avère être plus performante que chaque modalité prise isolément (Figure 6). Dans cette étude, la performance était évaluée par le temps de réponse au freinage. Si un signal d'avertissement fournit une information bimodale, la phase d'alerte (première étape du traitement d'un avertissement par les individus selon Rogers et al., 2000) semble donc pouvoir être optimisée. Les deux informations sensorielles co-occurentes pourraient également faciliter la compréhension du signal qui correspond à la troisième étape du traitement d'un avertissement par les individus selon Rogers et al. (2000). En effet, en situation naturelle, lorsque différentes informations sensorielles font état d'un même changement dans l'environnement, ce changement est plus facilement détecté par les individus (Bertelson & De Gelder, 2004).

Un autre objectif de cette première partie expérimentale était de déterminer l'effet de la combinaison de deux modalités sensorielles sur l'efficacité des systèmes d'avertissement aux sorties de voie. Pour ce faire une comparaison entre des SAS uni-modaux et bimodaux a été entreprise.

II. EXPERIENCE 1 : EFFICACITE COMPAREE DES ASSISTANCES AMORÇAGE MOTEUR ET AVERTISSEMENT AUX SORTIES DE VOIE

Publié dans :

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

A mon arrivée dans l'équipe PsyCoTec, cette étude avait déjà été initiée. La conception du plan d'expérience revient à Jean-Michel Hoc. Nous tenons également à remercier Élise Jolly pour avoir mené à bien une partie des passations expérimentales.

II.1 INTRODUCTION

Une étude antérieure réalisée sur piste a porté sur l'évaluation de deux SAS : une assistance de type avertissement (combinaison d'un avertissement sonore latéralisé et d'une vibration symétrique du volant) et une assistance nommée « suggestion d'action » correspondant à une première version de l'assistance amorçage moteur (Hoc et al, 2006). Lors de cette expérience deux types de situations avaient été étudiées : la récupération d'une dérive provoquée de la trajectoire (situation de sortie de voie imminente) et le contournement d'obstacles (situation d'invalidité du dispositif).

Des traces d'amélioration dans les manœuvres de récupération ont été constatées, plus nettement pour l'assistance avertissement que pour l'assistance suggestion d'action. Toutefois les conditions dans lesquelles étaient évaluées les deux assistances n'étaient pas rigoureusement identiques. Les deux assistances ont amélioré les manœuvres de récupération, de manière non significative, dans un virage où le côté de sortie était variable d'un participant à l'autre. L'avertissement s'est révélé être efficace en virage lorsque la déviation provoquait une sortie de voie sans sortie de route, tandis que la suggestion d'action s'est avérée présenter un effet négligeable et non significatif dans un virage où la sortie de voie était souvent une sortie de route. Les auteurs font l'hypothèse que dans la situation de sortie de route le stress était suffisant pour produire un retour rapide dans une position sûre indépendamment de la présence d'une assistance. Par ailleurs, les auteurs rapportent des effets très variables selon les individus de la suggestion d'action sur les manœuvres de récupération.

Dans la situation nécessitant l'évitement d'obstacles, les conducteurs devaient emprunter la voie de circulation opposée et donc faire face à une activation de l'assistance non pertinente. L'assistance indiquait en effet une sortie de voie volontairement entreprise par les conducteurs. Il n'y a pas eu de difficulté marquée de contournement d'obstacles.

Deux critiques principales peuvent être formulées à l'encontre de cette expérience. En premier lieu, les conditions contextuelles n'ont pas été suffisamment contrôlées (particulièrement la nature des virages choisis pour les situations de sortie de voie imminente et le côté de sortie de voie). C'est ainsi que l'assistance suggestion d'action a été testée dans des conditions plus défavorables que l'assistance avertissement (sortie de route imminente versus sortie de voie imminente). En second lieu, les deux assistances n'ont pas été suffisamment contrastées pour interpréter d'éventuelles différences entre les effets. Par ailleurs, beaucoup de résultats sont restés non généralisables du fait d'une trop faible précision expérimentale.

Au vu des limitations de cette étude sur piste, nous avons souhaité évaluer la pertinence du concept d'amorçage moteur dans un contexte expérimental bien contrôlé, comme la simulation de conduite l'y autorise. Notre objectif principal était de tester l'hypothèse d'une intervention directe de l'assistance amorçage moteur au niveau de l'action, hypothèse en accord avec les résultats obtenus par Suzuki et Jansson (2003), qui ont observé des corrections au volant sans analyse de la scène visuelle (correction au volant aggravant la sortie de voie). Au contraire, les SAS permettent d'aider les conducteurs dans leur diagnostic de la situation, mais n'agissent pas sur la préparation de l'action (Kovordányi et al., 2005). L'amorçage moteur, de par son intervention directe au niveau de l'action, devrait être plus efficace pour aider les conducteurs en situation de sortie de voie imminente que les SAS plus classiques.

Au travers la réalisation de ce premier objectif, plusieurs sous-objectifs ont été élaborés. Premièrement, le dispositif d'amorçage moteur et le concept relatif à son niveau d'intervention ont été confrontés à une assistance imitant le bruit d'un passage sur des bandes rugueuses. Cette comparaison à un dispositif de référence, présent sur nos routes depuis plusieurs années, permettra d'étalonner l'efficacité de l'amorçage moteur sur un dispositif déjà connu. Deuxièmement, les performances obtenues en présence de l'amorçage moteur seront également confrontées à celles d'un dispositif délivrant une vibration non latéralisée sur le volant. De la sorte, le niveau d'intervention du dispositif amorçage moteur dans les boucles perceptivo-motrices pourra être dissocié de son intervention vibro-tactile sur le volant. Finalement un comparatif entre un avertissement sonore latéralisé et un avertissement vibratoire non latéralisé indiquera d'éventuels bénéfices liés à l'utilisation de l'une ou à l'autre de ces modalités sensorielles.

Notre deuxième objectif était de déterminer l'effet de la combinaison de deux modalités sensorielles sur l'efficacité des SAS. Une combinaison de deux SAS de type avertissement devrait permettre un meilleur diagnostic de la situation et donc des réponses plus efficaces (Ho et al., 2006). La combinaison d'une assistance de type avertissement et de l'amorçage

moteur devrait améliorer à la fois la réalisation motrice de l'action et le diagnostic de la situation.

Par ailleurs, nous avons souhaité étudier les éventuels effets de l'introduction de SAS (avertissements et amorçage moteur) sur les comportements de conduite en dehors des situations de sortie de voie imminentes. La présence d'une assistance pourrait donner lieu à l'apparition d'adaptations comportementales négatives. Deux formes d'adaptations comportementales négatives ont été envisagées et considérées pour cette étude.

Premièrement, des adaptations comportementales négatives lorsque l'assistance se trouve en situation d'invalidité. Quels sont les effets produits par la présence d'une assistance délivrant un message non pertinent ? Les conducteurs sont effectivement confrontés à cette situation lors d'un franchissement de voie volontaire. Dans la pratique, le déclenchement du signal d'assistance serait également conditionné par l'absence d'activation des indicateurs de changement de direction (couramment appelés clignotants). Nous avons donc souhaité confronter les conducteurs à une situation de contournement d'un véhicule, placé sur la voie de circulation, impliquant un franchissement de voie volontaire. Dans cette situation, les conducteurs devaient aller à l'encontre du dispositif afin de mener à bien leur activité de contournement.

Deuxièmement, l'introduction d'un SAS pourrait affecter globalement le guidage du véhicule (et particulièrement le contrôle latéral). La présence de l'assistance pourrait, en effet, inciter les conducteurs à maintenir leur véhicule plus au centre de la voie ou au contraire à être moins attentifs à leur positionnement latéral, sachant qu'une assistance équipe le véhicule. De manière à évaluer de telles adaptations comportementales, nous nous sommes intéressé au positionnement latéral moyen des conducteurs ainsi qu'à sa variabilité.

II.2 METHODES

II.2.1 Participants

Vingt participants (2 femmes et 18 hommes) ont été volontaires pour participer à cette expérience. Ces conducteurs étaient âgés de 19 à 57 ans, l'âge moyen étant de 27 ans. L'expérience de conduite des participants (nombres d'années écoulées depuis l'obtention du permis de conduire) variait entre 2 et 39 ans (8 ans en moyenne). Les conducteurs participant à l'étude ont déclaré faire entre 1000 et 20000 kilomètres par an (7450 kilomètres en moyenne). L'ensemble des participants déclaraient également avoir une acuité visuelle normale, parfois corrigée.

II.2.2 Simulateur

Cette étude a été menée sur un simulateur à base fixe développé par l'équipe modélisation, simulation et simulateur de conduite (MSIS) du département recherche de l'INRETS. Le simulateur de conduite dénommé SIM² est composé d'un habitacle réduit de véhicule et d'un logiciel en charge de générer une scène visuelle dynamique fonction des déplacements du véhicule dans un espace virtuel (Figure 17).



Figure 17. Photo du simulateur SIM² tel qu'il est utilisé au sein de l'équipe PsyCoTec à Nantes.

La cabine de simulation est composée des interfaces classiques (que sont le volant et le pédalier) permettant de guider un véhicule réel. Le volant utilisé est un volant à retour de force qui permet de restituer, au mieux, les sensations éprouvées en situation de conduite réelle. Les pédales offrent également une résistance à l'enfoncement. Le pédalier est équipé des trois pédales usuelles : une pédale d'accélérateur, une pédale de frein et une pédale d'embrayage. Le simulateur est équipé d'une boîte de vitesse manuelle à cinq rapports. La cabine de simulation offre également la possibilité aux conducteurs d'attacher leur ceinture de sécurité, d'utiliser le frein à main et d'actionner physiquement les clignotants quand ils le désirent. La figure 17 présente une photo du simulateur de conduite SIM² tel qu'il est utilisé à Nantes.

La scène visuelle projetée est également visible sur la photo de la figure 17. L'écran utilisé pour la projection de la scène visuelle mesurait 2.40 m de large et 1.91 m de haut. Du point de vue conducteur cela correspondait à un angle visuel d'environ 62° horizontalement et 51° verticalement. Un compteur de vitesse (analogique et digital) était projeté en bas à gauche de

l'écran de projection. Une base de données visuelle correspondant à la modélisation de la piste d'essai du GIAT¹¹ à Satory (Versailles) a été utilisée. Le tracé de cette piste correspond au tracé d'une route de type départementale à deux voies de circulation opposées. La réalisation d'un tour de piste complet nécessite de parcourir environ 3.4 km en empruntant 15 lignes droites et 14 virages de rayons de courbure variés (voir Figure 20 pour une illustration du tracé de la piste).

De plus amples détails sur la description du simulateur de conduite SIM² utilisé dans notre étude sont disponibles dans Espié (1999) et Espié, Mohellebi et Kheddar (2003). La figure 18 présente un schéma simplifié de l'architecture d'un simulateur selon l'équipe MSIS. Le conducteur, placé dans un simulateur de conduite, interagit avec une instrumentation (volant et pédalier) restitrice d'efforts. Cette restitution d'effort est fonction du modèle dynamique du véhicule. Dans notre cas, il n'y a pas de restitution de mouvements car le simulateur SIM² est à base fixe. Le modèle dynamique du véhicule tient compte du modèle de la route et gère les restituteurs sonore et visuel du simulateur via des modèles pour les deux types d'informations sensorielles. Les modèles sonores et visuels intègrent le trafic généré par la simulation.

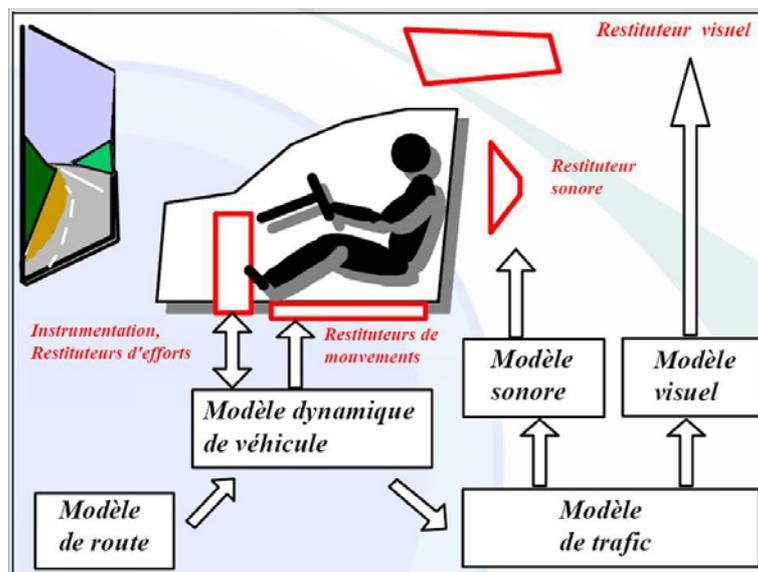


Figure 18. Exemple d'architecture d'un simulateur. D'après l'équipe MSIS de l'INRETS.

II.2.3 Dispositifs d'assistance à la conduite

Cinq dispositifs d'assistance au contrôle latéral ont été utilisés lors de cette expérience. Ces assistances ont été développées par le LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-

¹¹ Groupement Industriel des Armements Terrestres

Infrastructures-Conducteurs), voir Netto et al., 2003 pour une description technique. Les assistances ont ensuite été implémentées sur le simulateur par l'équipe MSIS. L'ensemble des dispositifs évalués entraient en fonctionnement lorsque le centre du véhicule dépassait un seuil situé à 80 cm du centre de la voie. Les assistances restaient en activité jusqu'au moment où le centre du véhicule repassait sous ce seuil de 80 cm.

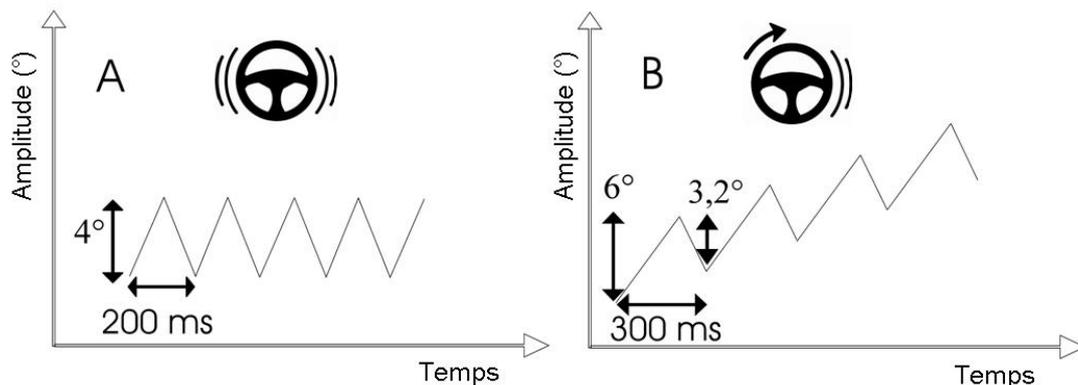


Figure 19. Oscillations du volant générées par le dispositif avertissement vibratoire (A) et par le dispositif amorçage moteur (B).

- L'avertissement sonore latéralisé (AvSon) produisait un son du côté de sortie (gauche ou droite). Ce son imitait le bruit de passage d'un véhicule sur des bandes rugueuses. Il était émis par un des deux haut-parleurs situés à un mètre, de part et d'autre du conducteur.
- L'avertissement vibratoire (AvVib) consistait en une vibration symétrique du volant. Une commande de forme triangulaire était appliquée sur la colonne de direction du simulateur. La fréquence de ce signal était de 5 Hz et son amplitude de 4° (Figure 19a).
- L'avertissement sonore et vibratoire (AvSV) combinait les dispositifs d'assistance avertissement sonore latéralisé et avertissement vibratoire précédemment décrits.
- L'amorçage moteur (AM) entraînait une vibration asymétrique de forme triangulaire du volant. La fréquence du signal était de 3.3 Hz. L'amplitude du mouvement de volant était de 6° dans la direction du centre de la voie et de 3.2° dans la direction de la sortie de voie (Figure 19b).
- L'amorçage moteur et l'avertissement sonore latéralisé (AMSon) consistaient en la combinaison des modes AM et AvSon.

Finalement, une condition sans assistance (SA) a été mise en place pour servir de condition contrôle.

II.2.4 Procédure

L'expérience a été divisée en deux sessions expérimentales de 90 minutes chacune. Lors de la première session expérimentale, les conducteurs réalisaient deux tours de circuit (Figure 20) afin de se familiariser avec le simulateur. Suite à cette phase de familiarisation, deux des cinq dispositifs d'assistance étaient évalués ; les trois autres dispositifs étaient évalués dans la deuxième session. Dans les deux sessions, une alternance entre les tours, avec et sans assistance, a été menée. Ainsi deux tours sans assistance (tours contrôles) précédaient deux tours assistés par un même dispositif. Un tour complet de la piste (Figure 20) était réalisé pour chaque essai.

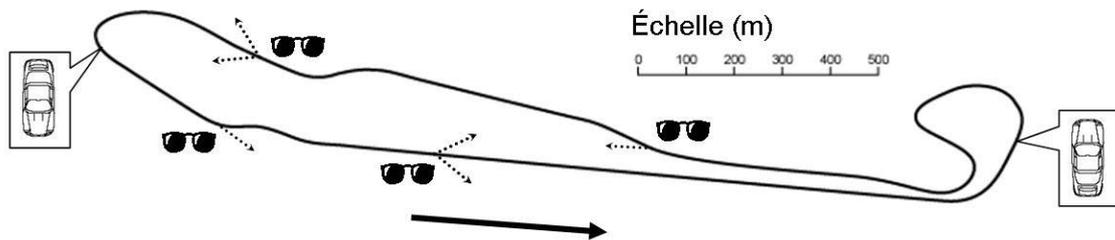


Figure 20. Représentation du tracé du circuit utilisé. La flèche pleine indique le sens de circulation des participants. Les lunettes noires représentent les différents endroits du circuit où les occlusions visuelles étaient déclenchées. Le(s) côté(s) de sortie de voie potentiel(s) est (sont) représenté(s) par les flèches pointillées. Seules deux occlusions visuelles par tour étaient introduites. Les deux véhicules représentent les deux endroits où des contournements pouvaient avoir lieu.

Le principe de fonctionnement de chaque dispositif d'assistance était expliqué aux conducteurs immédiatement avant qu'ils ne l'expérimentent. L'ordre de présentation des différents dispositifs d'assistance a été contrebalancé entre les participants (Voir annexes pour la présentation du plan expérimental).

Les conducteurs avaient pour consigne de conduire dans la voie de circulation de droite et de respecter les limitations de vitesse présentes tout au long de la piste. Au cours de chaque tour effectué, deux occlusions visuelles non prévisibles par les conducteurs étaient déclenchées : l'une juste avant l'entrée dans un virage et l'autre en ligne droite. La figure 21 présente les endroits et le côté des sorties de voie provoquées. Les conducteurs avaient pour consigne de ne plus agir sur le volant lors de la survenue d'une occlusion visuelle. Que ce soit pour les virages ou pour les lignes droites les conducteurs maintenaient donc le cap de leur véhicule. Par conséquent, les occlusions visuelles qui prenaient place juste avant l'entrée dans un virage à droite (d'un rayon de courbure de 440 mètres) entraînaient une sortie de voie vers la gauche. La sortie résultait donc en un écart sur la voie de gauche. Les occlusions

visuelles intervenant immédiatement avant l'entrée dans un virage à gauche (d'un rayon de courbure de 130 mètres) entraînaient une sortie de voie vers la droite et donc une sortie de route. Pour les occlusions survenant en ligne droite et de manière à standardiser le côté de sortie de voie, une légère déviation de l'angle de cap du véhicule ($\pm 0.9^\circ$) était opérée. Les conducteurs n'étaient pas informés de cette manipulation et ne pouvaient donc pas anticiper le côté de sortie de voie. Ainsi, pour les deux lignes droites où des occlusions pouvaient prendre place, la sortie était provoquée soit vers la droite soit vers la gauche.

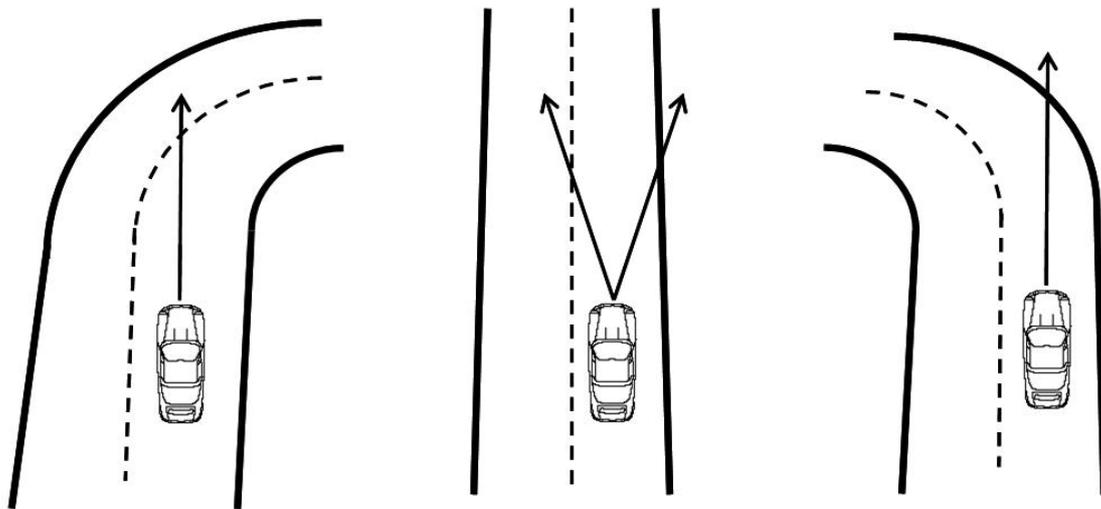


Figure 21. Les différents endroits où étaient déclenchées les occlusions visuelles et les sorties de voie qu'elles engendraient.

La figure 22 présente le déroulement de la survenue d'une situation critique en prenant pour exemple une sortie de voie vers la droite, en ligne droite. Les conducteurs roulent normalement dans leur voie de circulation lorsqu'une occlusion visuelle survient (étape 1 sur la figure). Les conducteurs sont alors complètement privés de la scène visuelle générée par le simulateur. Dans le cas des lignes droites, l'angle de cap est légèrement modifié afin de provoquer une sortie du côté souhaité (ici vers la droite). L'étape 2 sur la figure représente le véhicule sur le point de sortir de sa voie de circulation. Le dispositif d'assistance entre alors en marche et l'occlusion visuelle est levée au même moment. Le dispositif d'assistance reste en marche aussi longtemps que le véhicule demeure dans une position jugée dangereuse, à savoir lorsqu'il se trouve partiellement en dehors de sa voie de circulation (étape 3 sur la figure). Lorsque le véhicule se trouve de nouveau dans la voie, le dispositif d'assistance prend fin (étape 4). Les conducteurs retrouvent finalement une position latérale sûre et stabilisée dans leur voie de circulation (étape 5).

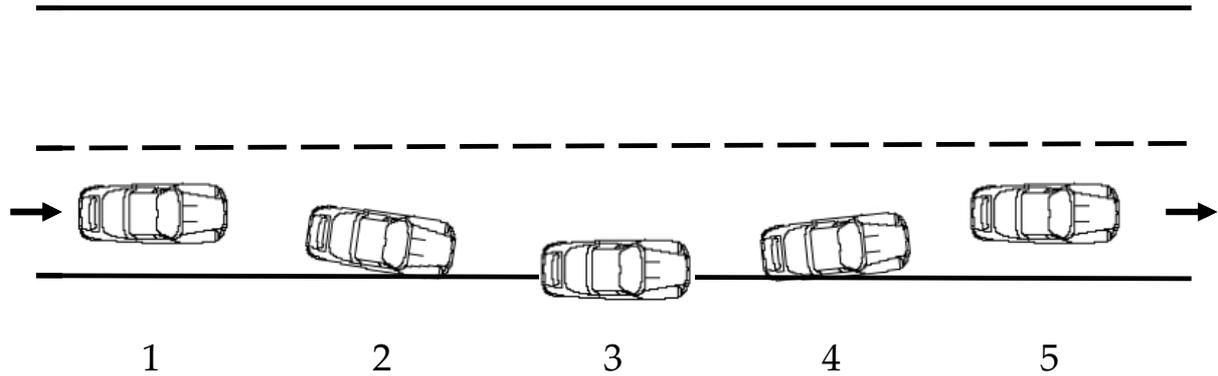


Figure 22. Exemple d'une sortie de voie vers la droite en ligne droite.

Outre les situations critiques, une situation mettant en invalidité l'assistance a été provoquée. La mise en invalidité du dispositif d'assistance correspond ici au contournement d'un obstacle contraignant le conducteur à agir contre le dispositif d'assistance. Deux véhicules en stationnement gênant sur le bord de la route ont été utilisés, l'un était placé en ligne droite et l'autre en sortie de virage (Figure 20). L'évitement de l'obstacle nécessitait de franchir le centre de la route et donc de déclencher le dispositif d'assistance lorsque celui-ci était présent.

Tout au long de l'expérience, un trafic était présent sur la voie de circulation opposée. Les conducteurs croisaient ainsi de 3 à 4 véhicules par kilomètre parcouru. L'ensemble des véhicules constituant ce trafic se déplaçaient à une vitesse de 60 km/h. Cependant, les scénarios expérimentaux ont été structurés de manière à ce qu'il n'y ait jamais de véhicule à proximité lors des situations critiques et des contournements, de sorte que les conducteurs n'ont jamais eu à gérer un risque de collision potentiel. Les conducteurs n'étaient toutefois pas informés de cette absence de trafic pour les situations critiques comme pour les contournements. Il est à noter qu'en raison de l'angle visuel horizontal limité offert par le simulateur, l'absence de trafic était visible en lignes droites mais pas en virage.

II.2.5 Analyse des données

Trois situations ont été analysées : les situations critiques, les situations de contournement d'obstacle et une situation nominale où les dispositifs d'assistances étaient présents mais non actifs.

L'effet de chaque assistance a été évalué en rapport à la condition contrôle à l'aide du test *t de Student*. Les données obtenues en condition contrôle (sans assistance) ont ensuite été soustraites, essai par essai, des données obtenues avec l'utilisation des différentes assistances évaluées. Toutes les ANOVAs ont ainsi été réalisées sur les effets des différentes assistances (AvSon, AvVib, AvSV, AM et AMSon). Le test de Newman-Keuls a été utilisé pour les comparaisons post-hoc. Un seuil de signification de .05 a été utilisé pour tous ces tests.

Ces statistiques ont été complétées par une analyse d'inférence fiduico-bayésienne (voir Lecoutre & Poitevineau, 1992 et Rouanet, 1996). Ces statistiques permettent d'inférer la taille de l'effet sur la population de référence (δ) et ce, à partir des effets observés (d). Une garantie (probabilité) de .90 a été utilisée pour calculer ces tailles d'effet. Lorsque l'effet observé (d) paraissait notable, nous avons cherché à prouver que l'effet parent (δ) l'était aussi, en montrant qu'il était très probablement plus grand qu'une valeur notable (a): $P(\delta > a) = .90$, résumé dans le texte en $\delta > a$. Quand (d) nous apparaissait négligeable, nous avons cherché à prouver que δ l'était aussi, par une conclusion de type $P(|\delta| < \varepsilon) = .90$, résumé dans le texte en $|\delta| < \varepsilon$, avec ε considéré comme négligeable. Toutefois, avec de grandes dispersions, ce type de conclusion ne s'est pas toujours avéré possible car les valeurs ε étaient trop grandes. Dans ces cas, nous avons noté qu'il n'était pas possible de conclure inférentiellement sur la grandeur de l'effet.

- **Situations critiques**

La figure 23 présente comment les variables d'intérêt relatives aux situations critiques se répartissent temporellement à l'aide d'un exemple représentatif. De manière à évaluer les performances des conducteurs lors des situations critiques, la principale variable d'intérêt a été définie comme le temps passé par les conducteurs dans une position dangereuse sur la voie. Cette variable nommée durée de sortie de voie, correspond au temps que le centre du véhicule conduit passe à plus de 80 cm du centre de la voie de circulation des conducteurs (seuil équivalent à une partie du véhicule en dehors de la voie). Les temps de réponse ont également été calculés afin de qualifier la réactivité des conducteurs suite à une sortie de voie. Cette variable correspond au temps qui sépare le franchissement du seuil de déclenchement des assistances du moment où les conducteurs initient un mouvement de volant. Les pics d'accélération au volant, lorsque le conducteur corrige la trajectoire de son véhicule après avoir terminé la tâche de lecture, ont également été analysés. Cette variable est utilisée pour déterminer la vivacité de la correction de la trajectoire. Finalement, la taille des surcompensations en termes de position latérale a été étudiée. Les surcompensations correspondent à l'écart que font les conducteurs du côté opposé à celui de la sortie de voie (écart latéral maximum par rapport au centre de la voie du côté opposé au côté de sortie de voie). Les situations critiques provoquées en virage et celles provoquées en ligne droite ont été analysées séparément.

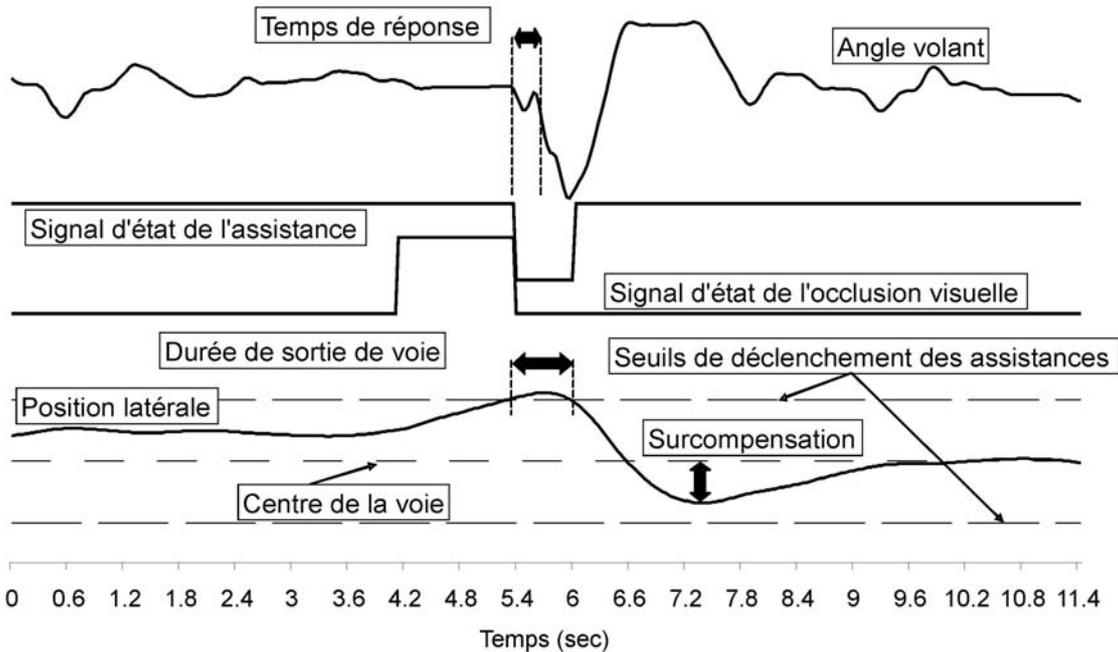


Figure 23. Exemple représentatif des événements et résultats enregistrés lors d'une situation critique.

- **Situations de contournement**

Pour la situation de contournement, le temps de pré-contact avec le véhicule à contourner a été calculé. Ce temps se définit comme le temps séparant le véhicule conduit du véhicule à éviter lorsqu'une partie du véhicule conduit a franchi le centre de la route. La taille de l'écart latéral maximum sur la voie de gauche réalisé lors de la manœuvre de contournement a également été calculée. Finalement la durée des contournements, définie comme le temps passé par une partie du véhicule sur la voie de gauche, a été analysée.

- **Situation nominale**

L'analyse a porté sur trois portions du circuit : un virage à droite d'un degré de courbure moyen d'environ 80 m, un virage à gauche d'un degré de courbure moyen d'environ 70 m et une portion de ligne droite de 220 mètres. Des tronçons du circuit autres que ceux où les situations critiques et d'invalidité pouvaient prendre place ont été utilisés. Des analyses indépendantes ont été réalisées pour les trois portions de circuit. Les résultats obtenus avec chaque dispositif d'assistance ont été comparés statistiquement à la condition sans assistance puis entre eux. Notre analyse s'est portée sur les vitesses de conduites spontanées moyennes, le positionnement latéral moyen du véhicule dans sa voie et la variabilité du positionnement latéral. Le positionnement latéral moyen est exprimé relativement au centre de la voie. Par convention un décalage vers la droite du centre de la voie est considéré comme positif tandis qu'un décalage vers la gauche est considéré comme négatif.

II.3 RESULTATS

II.3.1 Situations critiques

- **Durées de sortie de voie**

- Virages

Globalement, chaque dispositif d'assistance utilisé s'est révélé réduire les durées de sortie de voie comparativement à la condition contrôle. Cette différence entre la condition contrôle et chaque dispositif d'assistance est systématiquement significative ($p < .05$).

L'ANOVA a montré un effet significatif du dispositif d'assistance utilisé sur la durée des sorties de voie ($F(4, 60) = 5.03, p < .001$; Figure 24). Aucune différence significative n'est apparue entre les assistances AM et AMSon ($p < .05$). De manière similaire, les assistances AvSon, AvVib et AvSV ne différaient pas significativement les unes des autres. Les assistances AM et AMSon donnaient lieu aux plus grandes réductions des durées de sortie de voie, avec des réductions de respectivement 805 et 825 ms comparativement à la condition contrôle (SA). Les trois autres assistances (AvSon, AvVib et AvSV) ont réduit les durées de sorties de voie de 391 ms en moyenne. Les Assistances AM et AMSon entraînent des réductions de durée de sortie de voie significativement plus importantes que les trois autres assistances évaluées (réduction supplémentaire moyenne de 425 ms, $\delta > 269$ ms, $t(15) = 3.66, p < .002$).

Les statistiques ont également révélé une influence du côté de sortie de voie sur les effets des dispositifs d'assistance. Les dispositifs d'assistances entraînaient de plus fortes réductions des durées de sortie de voie après une sortie de voie vers la gauche (en direction de la voie de circulation opposée) qu'après une sortie de voie vers la droite (sortie de route; $d = 280$ ms, $\delta > 151$ ms, $t(15) = 2.92, p < .01$). Aucune interaction significative n'est apparue entre le côté de sortie de voie et les différents dispositifs d'assistance ($F(4, 60) = 0.65, p = .63$).

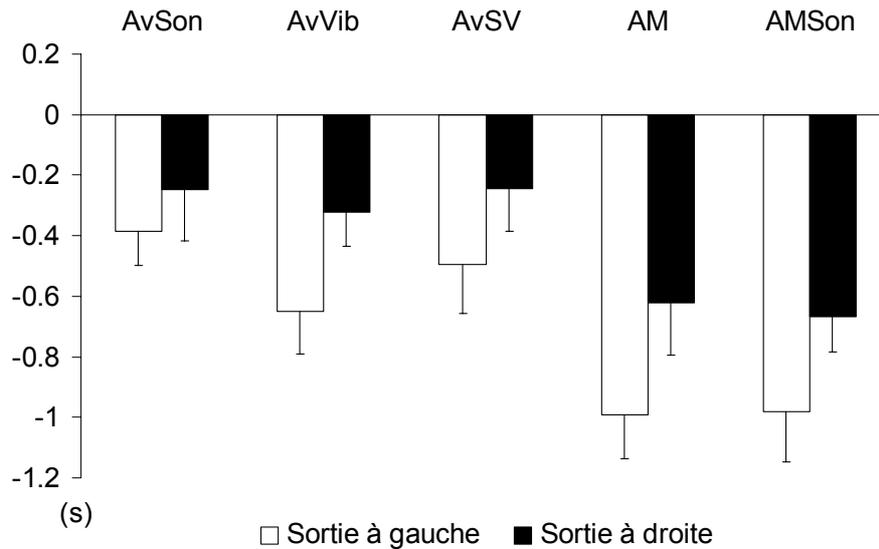


Figure 24. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les durées de sorties de voie en virages relativement à la condition contrôle (pour les sorties à gauche et à droite). Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 1.97$ s en moyenne).

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

— Lignes droites

Les statistiques ont montré que les effets observés en lignes droites étaient très similaires à ceux recueillis en virages. Chaque dispositif d'assistance a réduit les durées de sorties de voie en comparaison à la condition contrôle (Figure 25).

Un effet significatif du dispositif d'assistance sur les durées de sortie a été mis en évidence ($F(4, 60) = 4.12, p < .01$). Aucune différence significative n'est apparue entre les dispositifs d'assistance AM et AMSon d'une part, et entre les dispositifs AvSon, AvVib et AvSV d'autre part. Les dispositifs AM et AMSon sont apparus comme les assistances les plus performantes, en réduisant les durées de sortie de 467 ms en moyenne. Les assistances AvSon, AvVib et AvSV donnaient lieu à une réduction moyenne des durées de sortie de voie de 259 ms. Les dispositifs AM et AMSon étaient à l'origine de réductions plus importantes que les trois autres dispositifs (réduction supplémentaire moyenne de 208 ms ; $\delta > 134$ ms), $t(15) = 3.76, p < .002$).

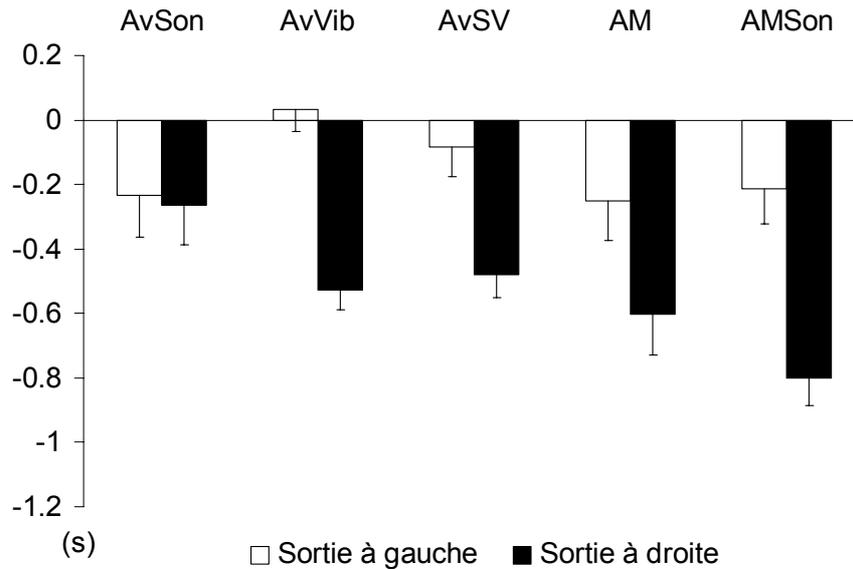


Figure 25. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les durées de sorties de voie en lignes droites relativement à la condition contrôle (pour les sorties à gauche et à droite). Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 1.39$ s en moyenne). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Le côté de sortie de voie avait une incidence sur les effets des dispositifs d'assistance. Contrairement à ce qui a été observé en virages, les assistances entraînaient de plus grandes réductions des durées de sortie de voie pour une sortie vers la droite (sortie de route) que pour une sortie vers la gauche (en direction de la voie opposée ; $d = 385$ ms, $\delta > 261$ ms, $t(15) = 4.15$, $p < .001$). L'influence du côté de sortie de voie était significativement affectée par le dispositif d'assistance considéré ($F(4, 60) = 5.19$, $p < .01$). Les analyses post hoc ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les sorties de voie vers la gauche et celles vers la droite pour le dispositif d'assistance AvSon ($p = .96$). Au contraire, les autres dispositifs d'assistance ont produits des effets différents en fonction du côté de sortie de voie (AvVib, AvSV, AM, AMSon : $p < .05$).

La figure 26 présente l'effet moyen de chaque dispositif d'assistance comparativement à la condition contrôle. L'effet moyen correspond à l'effet des assistances, indépendamment de l'endroit de sortie (lignes droites ou virages) et du côté de sortie (vers la gauche ou vers la droite).

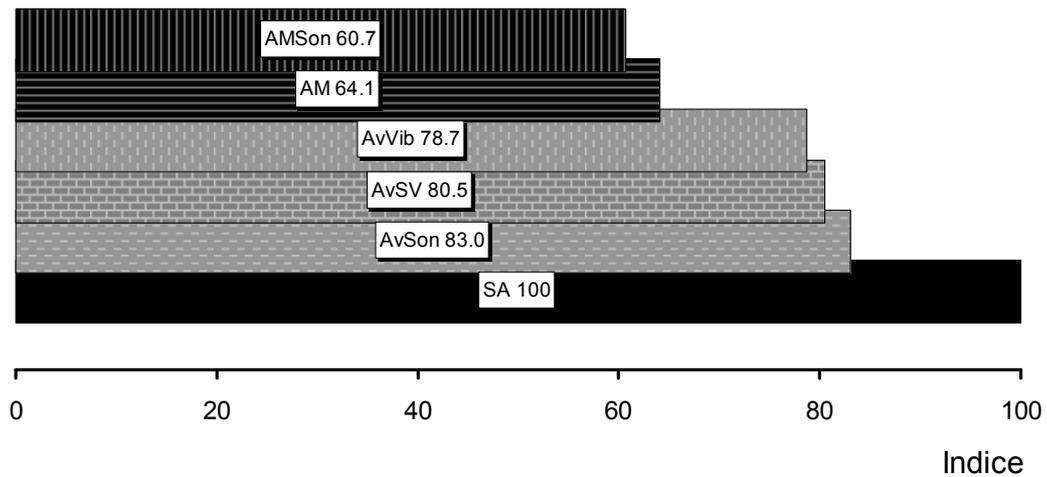


Figure 26. Durée de sortie de voie moyenne pour chaque dispositif d'assistance relativement à la condition contrôle (SA = 100).

- **Temps de réponse**

Les statistiques ont montré un effet significatif de l'ensemble des assistances sur les temps de réponse au volant comparativement à la condition contrôle, à la fois en virage (effet moyen observé (d) de 93 ms, $\delta > 72$ ms, $t(15) = 6.06$, $p < .001$; Figure 27) et en lignes droite ($d = 164$ ms, $\delta > 144$ ms, $t(15) = 10.98$, $p < .001$; Figure 28). Tous les dispositifs d'assistance ont amené une diminution similaire des temps de réponse. En effet, aucune différence significative n'a été observée en virage ($d = 29$ ms, $|\delta| < 49$ ms, $F(4, 60) = 1.63$, $p = .17$). En lignes droite, un effet a été trouvé ($d = 63$ ms, $\delta > 50$ ms, $F(4, 60) = 5.52$, $p < .002$) mais les analyses post hoc indiquent que seules les assistances AvVib et AMSon, diffèrent significativement l'une de l'autre ($p = .04$).

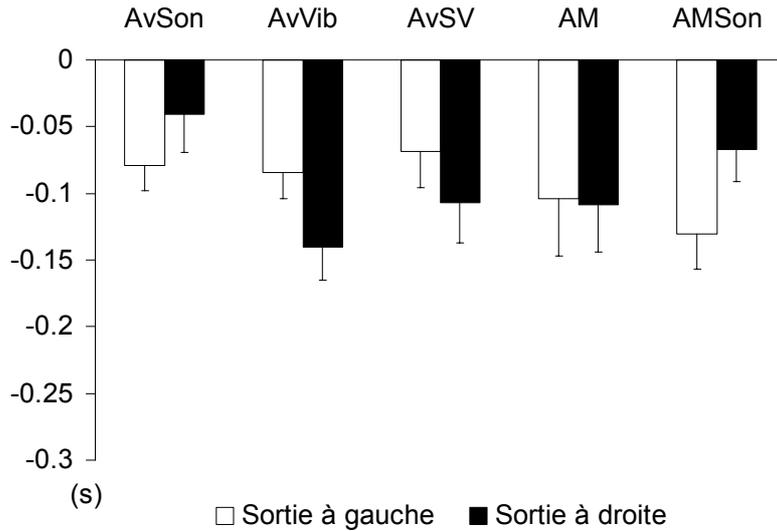


Figure 27. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les temps de réponse au volant pour les sorties en virages (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (SA = 0.45 s en moyenne).

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Le côté de sortie de voie n'affecte pas significativement les effets des différents dispositifs d'assistance, ni en virages ($t(15) = 0.03, p > .97$), ni en lignes droites ($t(15) = 1.58, p > .13$).

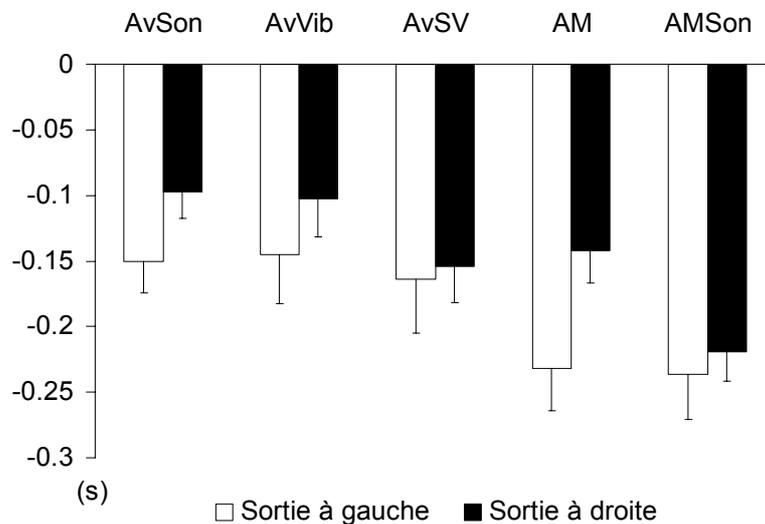


Figure 28. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les temps de réponse au volant pour les sorties en lignes droites (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (SA = 0.53 s en moyenne).

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

- **Pics d'accélération au volant**

Les patrons de résultats recueillis en virages et en lignes droites se sont révélés être très similaires (voir Figure 29 pour les virages et Figure 30 pour les lignes droites). Par

conséquent, les analyses ont été regroupées. Tous les dispositifs d'assistance ont augmenté les pics d'accélération au volant.

L'ANOVA a montré un effet significatif sur les pics d'accélération au volant selon le dispositif d'assistance considéré ($F(4, 60) = 18, p < .001$). L'effet de l'assistance AvSon sur les pics d'accélération au volant était significativement différent de celui observé avec les autres dispositifs d'assistance ($d = 0.7^\circ/s^2, \delta > 0.58^\circ/s^2, t(15) = 7.76, p < .001$). Les pics d'accélération étaient donc augmentés de manière moins importante avec l'assistance AvSon qu'avec les autres assistances.

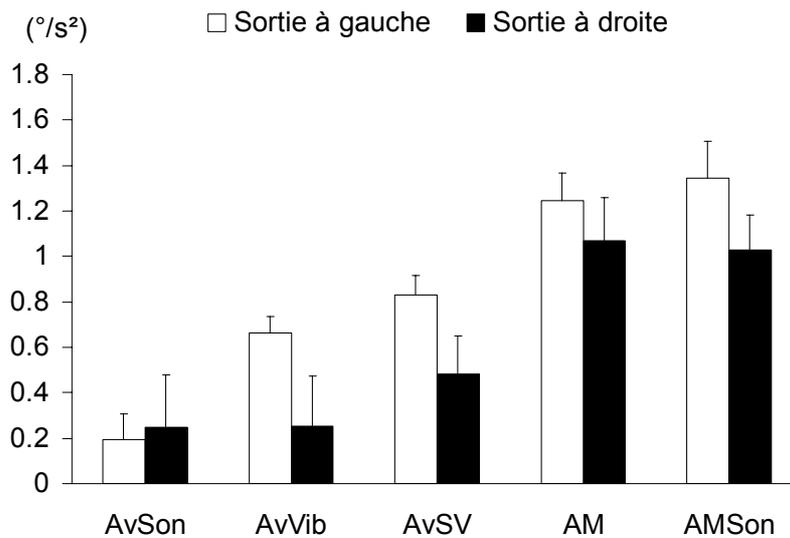


Figure 29. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les pics d'accélération au volant pour les sorties en virages (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 1.04^\circ/s^2$ en moyenne).

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Aucune différence significative n'est apparue entre les assistances AM et AMSon d'une part, et entre les assistances AvVib et AvSV d'autre part ($p < .05$). Une nouvelle fois, les dispositifs AM et AMSon ont engendré de plus larges effets que les assistances AvVib et AvSV ($d = 0.57^\circ/s^2, \delta > 0.49^\circ/s^2, t(15) = 9.99, p < .001$).

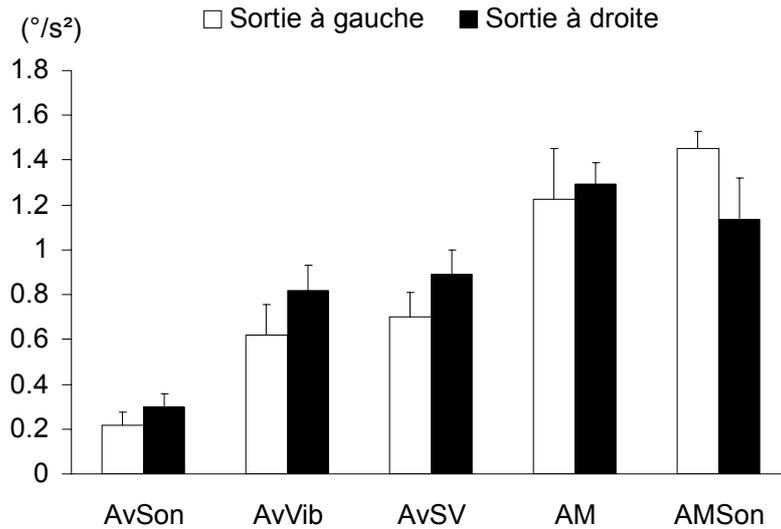


Figure 30. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les pics d'accélération au volant pour les sorties en lignes droites (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 0.53^\circ/s^2$ en moyenne).

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

- **Surcompensation**

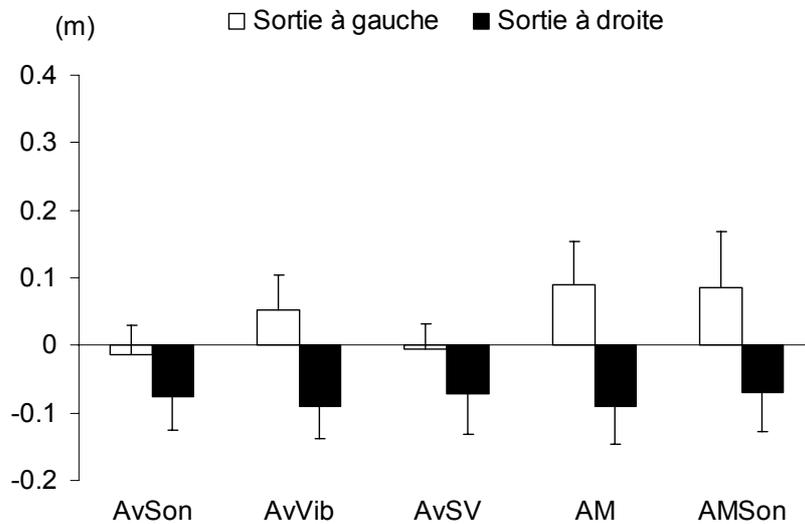


Figure 31. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les surcompensations pour les sorties en virages (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 0.59$ m en moyenne). Une valeur positive représente une augmentation des surcompensations, à l'inverse, une valeur négative représente une diminution.

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

En comparaison à la condition contrôle, aucune des assistances évaluées n'a amené à une différence significative dans la taille des surcompensations, ni en virages (diminution

moyenne de 0.02 m ; Figure 31), ni en lignes droites (augmentation moyenne de 0.08 m ; Figure 32).

Aucune différence significative n'a été observée entre les différents dispositifs d'assistance, ni en virages ($F(4, 60) = 0.43, p > .79$), ni en lignes droites ($F(4, 60) = 1.48, p > .22$).

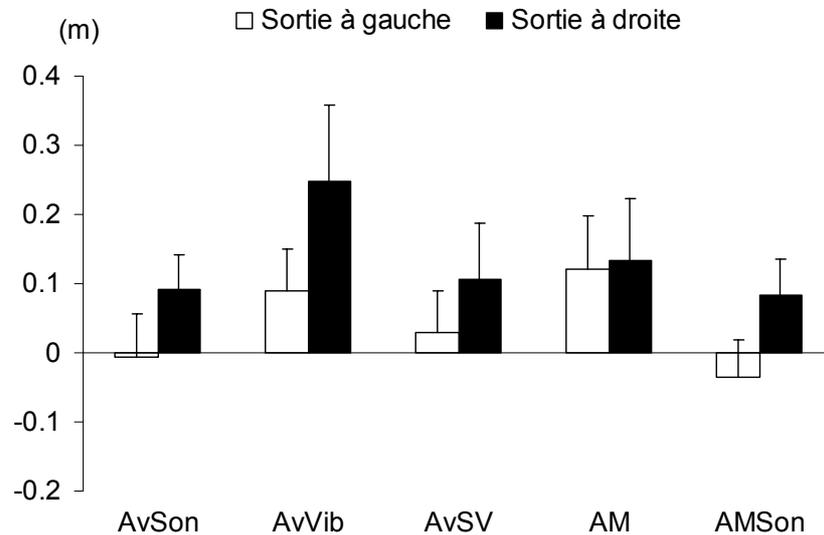


Figure 32. Effets des différents dispositifs d'assistance sur les surcompensations pour les sorties en lignes droites (gauche et droite) relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 0.30$ m en moyenne). Une valeur positive représente une augmentation des surcompensations, à l'inverse, une valeur négative représente une diminution.

Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

II.3.2 Situations de contournement

Les différents tableaux de résultats (Tableaux 11 à 16) présentent pour chaque type d'assistance : l'effet observé, la valeur de t -test et la probabilité associée. L'effet observé correspond à la différence entre la valeur observée pour chacune des assistances et la valeur recueillie en condition contrôle (SA).

- **Temps de pré-contact**

- Comparaison à la condition contrôle

En lignes droites, seules les assistances AvVib et AM entraînent une modification significative des temps de pré-contact pour les contournements d'obstacles (Tableau 11). Le temps de pré-contact moyen sans assistance était de 545 ms. Les assistances AvVib et AM entraînent donc respectivement des diminutions de plus de 24 et 19 % du temps de pré-contact avec le véhicule à éviter. En moyenne, les autres assistances (AvSon, AvSV et AMSon) réduisent les temps de pré-contact de 75 ms, soit plus de 13 %.

Tableau 11. Temps de pré-contact avec le véhicule à éviter en ligne droite en comparaison à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.047	1.02	p=0.32
AvVib	-0.132	3.67	p<0.01*
AvSV	0.001	0.01	p=0.99
AM	-0.108	2.53	p<0.03*
AMSon	-0.103	1.92	p=0.07

En virages, contrairement aux résultats observés en ligne droite, aucune assistance n'affecte significativement les temps de pré-contact comparativement à la condition contrôle (Tableau 12). Pour les contournements d'obstacles en virage, le temps de pré-contact moyen sans assistance était de 331 ms. En présence d'une assistance, les temps de pré-contact sont augmentés de 45 ms en moyenne, soit l'équivalent d'un peu moins de 8 % comparé à la condition contrôle.

Tableau 12. Temps de pré-contact avec le véhicule à éviter en virage en comparaison à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.032	1.83	p=0.08
AvVib	0.006	0.35	p=0.73
AvSV	0.023	0.01	p=0.99
AM	0.004	0.25	p=0.80
AMSon	0.042	0.97	p=0.34

— Comparatif entre assistances

Bien qu'en lignes droites les assistances AvVib et AM aient réduit le temps de pré-contact en rapport à la condition contrôle, les ANOVAs révèlent l'absence d'effet du type d'assistance sur les temps de pré-contact en lignes droites ($F(4, 60) = 2.08, p > .10$) comme en virages ($F(4, 60) = 1.36, p > .26$). La figure 33 présente les résultats obtenus à la fois pour les contournements en virage et en ligne droite.

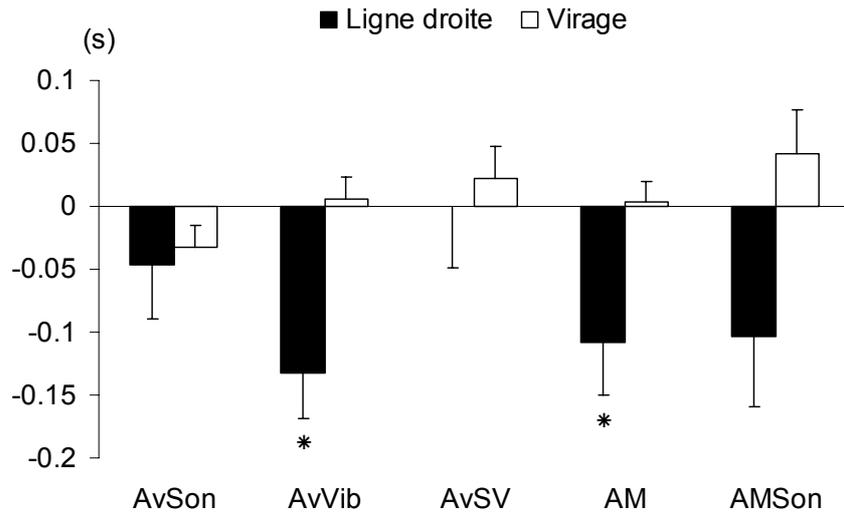


Figure 33. Effets des différents dispositifs d'assistance sur le temps de pré-contact relativement à la condition contrôle. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle ($SA = 0.545$ s en ligne droite et 0.331 s en virage). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

- **Écart latéral maximum**
 - Comparaison à la condition contrôle

Tableau 13. Écart latéral maximum en ligne droite comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (m)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	0.002	0.03	p=0.98
AvVib	0.106	1.67	p=0.11
AvSV	-0.002	0.02	p=0.98
AM	-0.03	0.57	p=0.58
AMSon	-0.113	1.74	p=0.10

En termes d'écart latéral maximum sur la voie de gauche, aucun dispositif d'assistance ne s'est distingué significativement de la condition contrôle, pour les lignes droites (Tableau 13) comme pour les virages (Tableau 14). En condition contrôle, les conducteurs réalisaient un écart maximal moyen sur la voie de gauche de 0.92 m en lignes droites, et de 1.18 m en virages (écart entre le centre du véhicule et le centre de la route).

Tableau 14. Écart latéral maximum en virage comparativement à la condition contrôlée.

Type d'assistance	Effet observé (m)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.065	0.72	p=0.48
AvVib	0.011	0.08	p=0.93
AvSV	0.061	0.63	p=0.53
AM	-0.06	0.54	p=0.59
AMSon	0.154	1.32	p=0.20

– Comparatif entre assistances

Les statistiques montrent l'absence de différence entre les divers dispositifs d'assistance évalués aussi bien en ligne droite ($F(4, 60) = 1.19, p > .33$) qu'en virages ($F(4, 60) = 0.63, p > .64$; Figure 34).

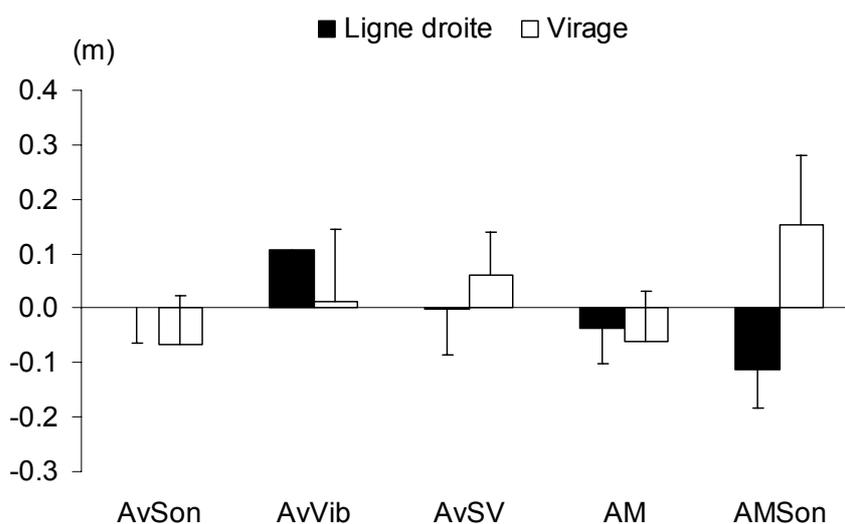


Figure 34. Effets des différents dispositifs d'assistance sur l'écart latéral maximum relativement à la condition contrôlée. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôlée ($SA = 0.92$ m en ligne droite et 1.18 m en virage). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

• **Durée des contournements**

– Comparaison à la condition contrôlée

En ligne droite, les assistances AvVib, AM et AMSon entraînent une modification significative des durées de contournement. Sans assistance, la durée moyenne des contournements d'obstacles opérés en ligne droite était de 2.83 s. Une réduction de respectivement 12.7, 13 et 21.5% des durées de contournement a ainsi été observée pour les assistances AvVib, AM et AMSon (Tableau 15).

Tableau 15. Durée de contournement moyenne en ligne droite comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.181	1.07	p=0.30
AvVib	-0.363	2.54	p<0.02*
AvSV	-0.240	1.13	p=0.27
AM	-0.368	2.14	p<0.05*
AMSon	-0.612	3.01	p<0.01*

En virage, les résultats obtenus sont très différents de ceux présentés pour les lignes droites. Seule l'assistance AvSon modifie significativement les durées de contournement (Tableau 16). Sans assistance, la durée moyenne des contournements d'obstacles opérés en virage était de 2.31 s. L'assistance AvSon a donc engendré une réduction de la durée de contournement de 13.5 %.

Tableau 16. Durée de contournement moyenne en virage comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.311	2.56	p<0.02*
AvVib	0.025	0.14	p=0.89
AvSV	0.069	0.46	p=0.65
AM	-0.191	1.58	p=0.13
AMSon	0.321	1.17	p=0.26

— Comparatif entre assistances

Les statistiques ont révélé l'absence de différence entre les divers dispositifs d'assistance évalués en ligne droite ($F(4, 60) = 1.40, p > .25$; Figure 35). Un effet du type de dispositif d'assistance a été mis en avant en virage ($F(4, 60) = 2.68, p < .04$). Les analyses post-hoc montrent toutefois que seules les assistances AvSon et AMSon diffèrent significativement l'une de l'autre.

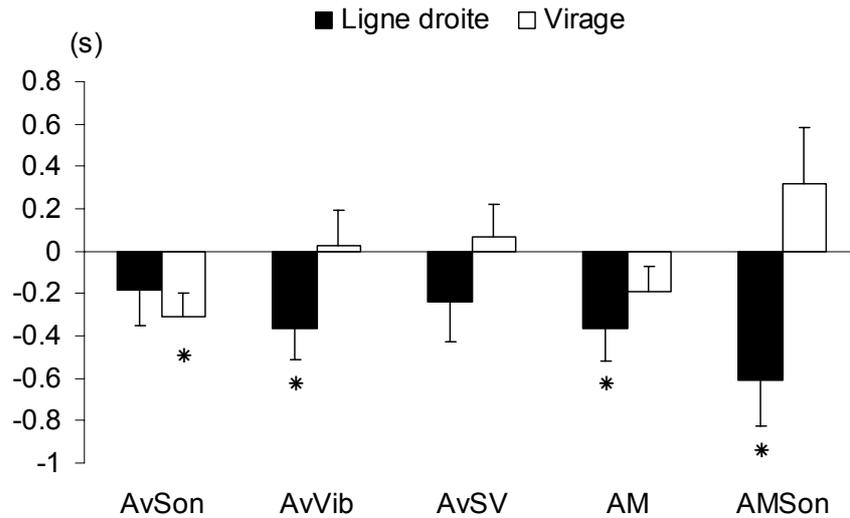


Figure 35. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la durée de contournement des obstacles. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (SA = 2.83 s en ligne droite et 2.31 s en virage).
Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

II.3.3 Situation nominale

- **Vitesse**

- Comparaison à la condition contrôle

Sans assistance, les conducteurs ont adopté une vitesse de conduite moyenne de 58.5 km/h dans le **virage** à droite sélectionné et de 55.3 km/h dans le virage à gauche. Aucune assistance n'a modifié significativement les vitesses de conduite spontanées en rapport à la condition contrôle ; ni en virage à droite, ni en virage à gauche ($p > 0.5$; Figure 36 en virage à droite et figure 37 en virage à gauche).

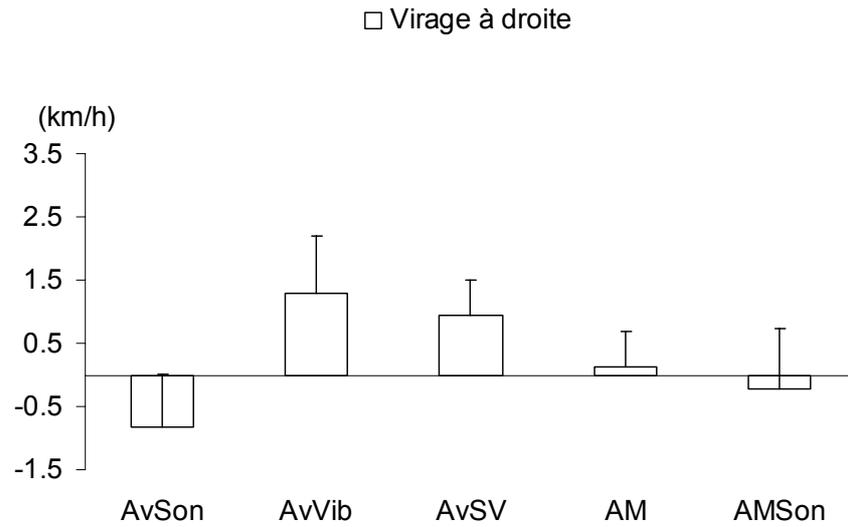


Figure 36. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la vitesse de conduite spontanée moyenne en virage à droite. Zéro sur le graphique représente 58.5 km/h, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

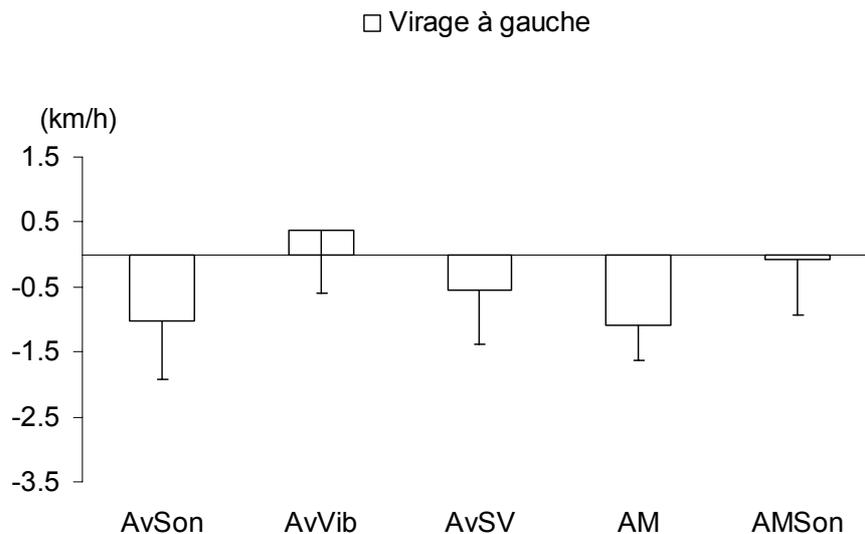


Figure 37. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la vitesse de conduite spontanée moyenne en virage à gauche. Zéro sur le graphique représente 55.3 km/h, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

En **ligne droite**, la vitesse de conduite spontanée moyenne était de 81.7 km/h. Seule l'assistance AvVib modifie significativement la vitesse moyenne adoptée par les conducteurs (Figure 38). Une augmentation modeste (1.87 km/h), équivalente à 2.3 % de la condition contrôle, est observée avec l'AvVib.

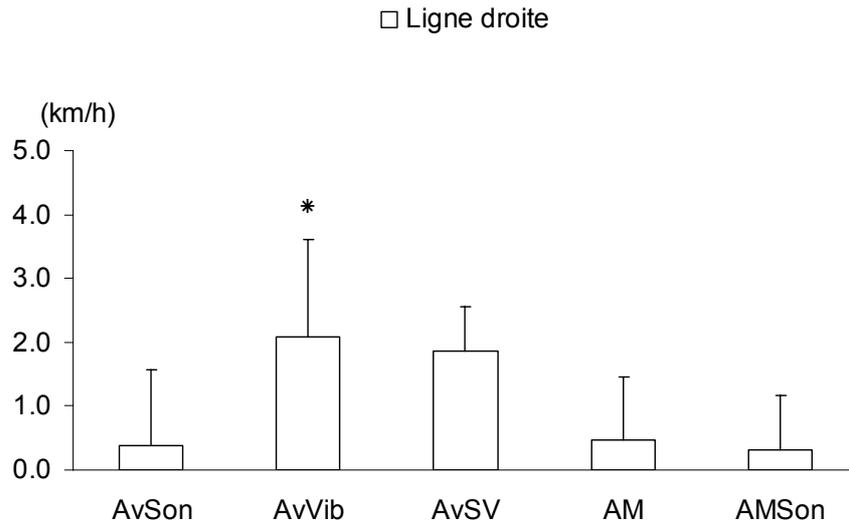


Figure 38. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la vitesse de conduite spontanée moyenne en ligne droite. Zéro sur le graphique représente 81.7 km/h, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

— Comparatif entre assistances

Les statistiques montrent l'absence de différence entre les divers dispositifs d'assistance évalués, aussi bien en ligne droite ($F(4, 60) = 1.09, p = .34$) qu'en virage : à droite ($F(4, 60) = 1.15, p = .34$) et à gauche ($F(4, 60) = 0.71, p = .59$).

• **Position latérale moyenne**

— Virage à droite

En virage à droite et sans assistance, les conducteurs ont adopté une position latérale moyenne située à 0.30 m à droite du centre de la voie. Les conducteurs tendent à « couper » le virage en se positionnant plutôt vers l'intérieur de ce dernier. La présence d'une assistance entraîne une réduction de l'écart au centre de la voie (Figure 39). Cependant, seules les assistances AvSon, AvSV et AMSon se différencient significativement de la condition non assistée ($p < .05$). Une analyse de la variance montre un effet différencié de l'assistance sur la position latérale moyenne adoptée par les conducteurs ($F(4, 60) = 3.10, p < .03$). Une analyse post-hoc indique que seuls les dispositifs AvSon et AvVib se démarquent significativement l'un de l'autre.

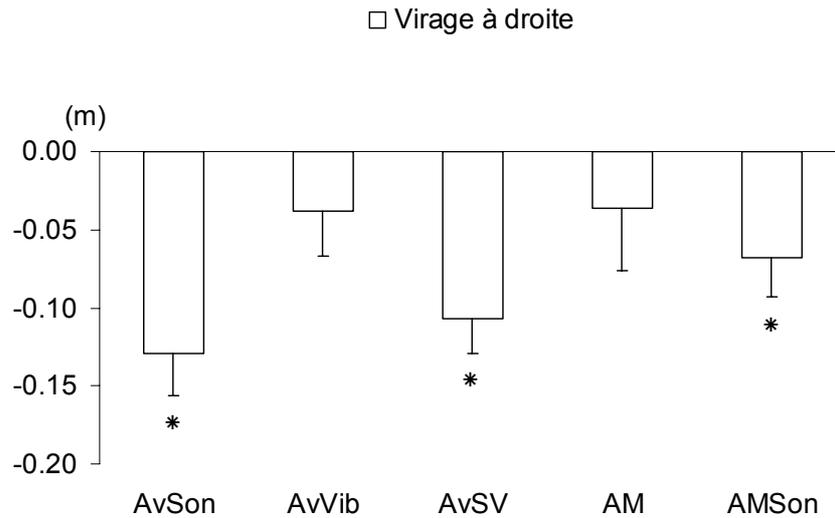


Figure 39. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur le positionnement latéral moyen en virage à droite. Zéro sur le graphique représente 0.30 m, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

— Virage à gauche

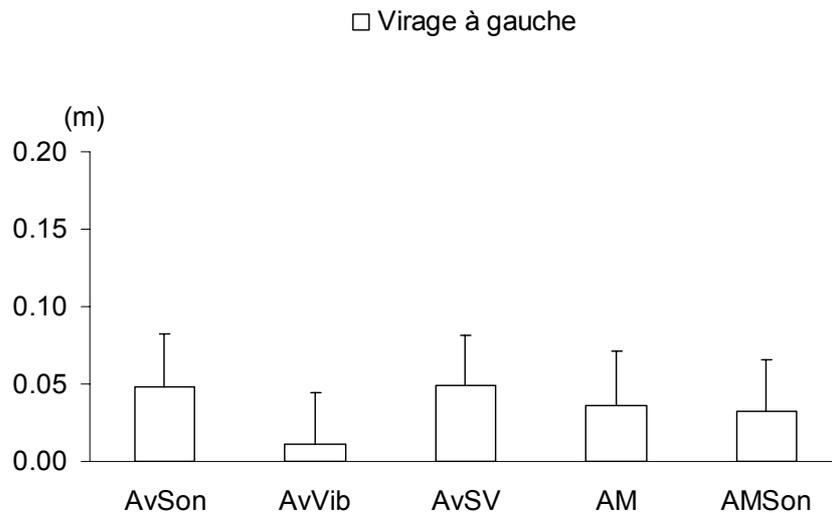


Figure 40. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur le positionnement latéral moyen en virage à gauche. Zéro sur le graphique représente 0.27 m, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

En virage à gauche et sans assistance, des résultats symétriques à ceux observés en virage à droite ont été enregistrés. Les conducteurs ont ainsi adopté une position latérale moyenne se situant plutôt vers l'intérieur du virage (0.27 m à gauche du centre de la voie en moyenne). Aucune assistance n'a modifié significativement le positionnement latéral moyen pour le virage à gauche, malgré une tendance descriptive à la réduction de l'écart au centre de la

voie (Figure 40). Aucun effet du dispositif d'assistance n'a été observé ($F(4, 60) = 1.35$, $p = .26$).

— Lignes droites

En ligne droite et en l'absence d'assistance, les conducteurs maintenaient leur véhicule légèrement à droite du centre de la voie (5 cm). Aucune différence statistique n'est apparue entre la condition sans assistance et les différentes conditions assistées. D'autre part, les statistiques montrent l'absence de différence entre les divers dispositifs d'assistance évalués ($F(4, 60) = 1.07$, $p > .38$; Figure 41).

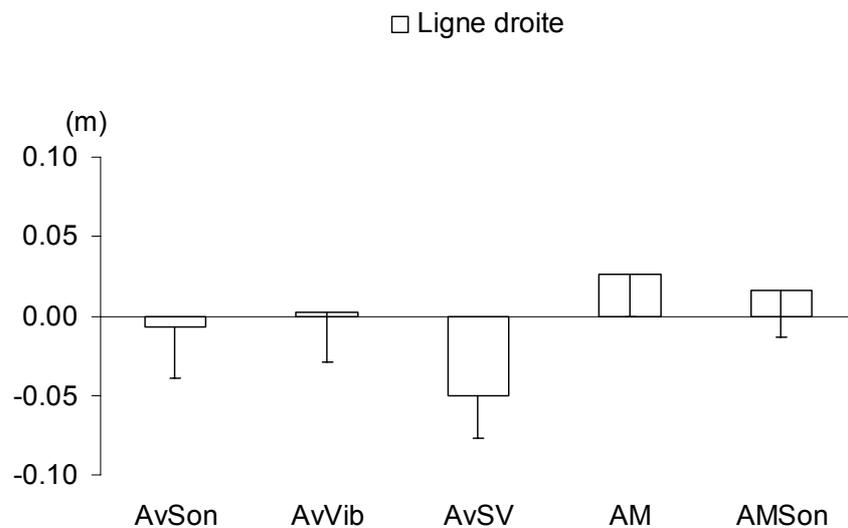


Figure 41. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur le positionnement latéral moyen en ligne droite. Zéro sur le graphique représente 0.05 m, valeur obtenue en condition contrôle. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

• **Variabilité de la position latérale moyenne**

— Comparaison à la condition contrôle

En **virage à droite** et sans assistance, la variabilité du positionnement latéral moyen était de 0.25 m. Les dispositifs d'assistance AvSon et AvSV ont engendré des réductions de cette variabilité que les statistiques ont révélées être significatives (Figure 42).

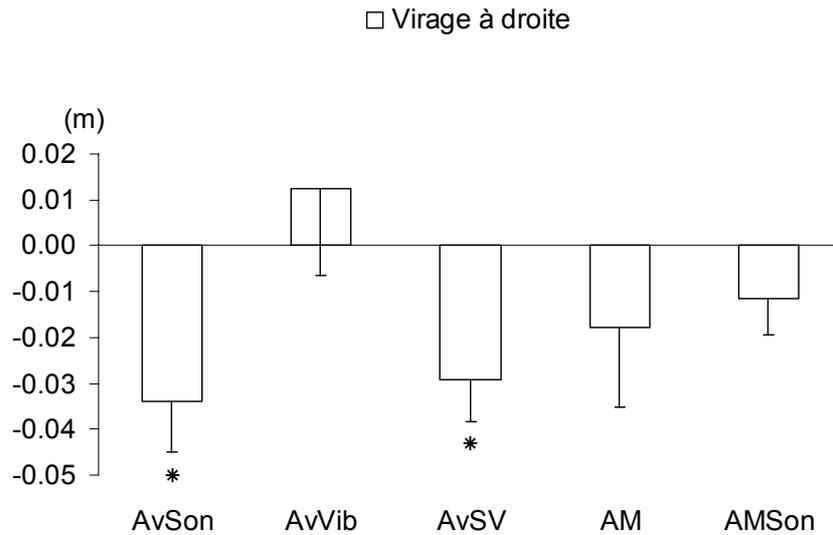


Figure 42. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la variabilité du positionnement latéral moyen en virage à droite. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (0.25 m). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

En **virage à gauche** et sans assistance, la variabilité du positionnement latéral moyen était de 0.44 m. Aucune assistance n'a modifié significativement le positionnement latéral moyen par rapport à la condition contrôle (Figure 43).

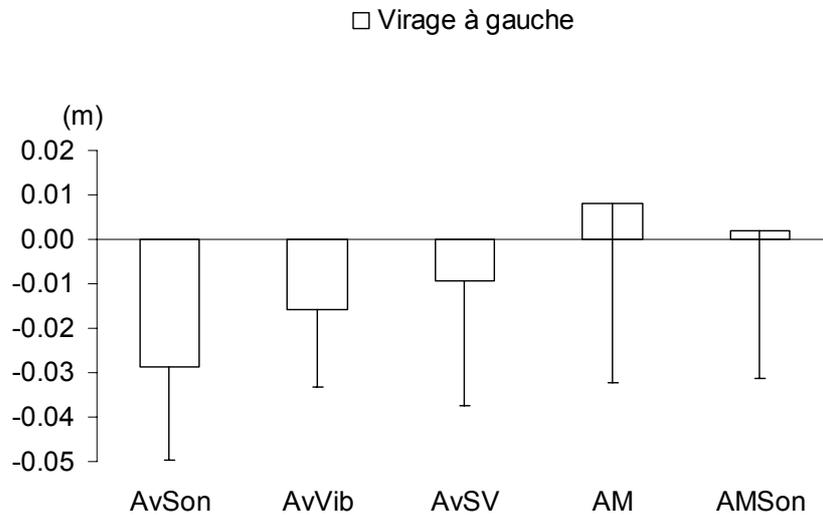


Figure 43. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la variabilité du positionnement latéral moyen en virage à gauche. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (0.44 m). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

En **ligne droite** la variabilité du positionnement latéral moyen était de 0.44 m pour la condition non assistée. Aucune assistance n'a modifié significativement le positionnement latéral moyen par rapport à la condition contrôle (Figure 44).

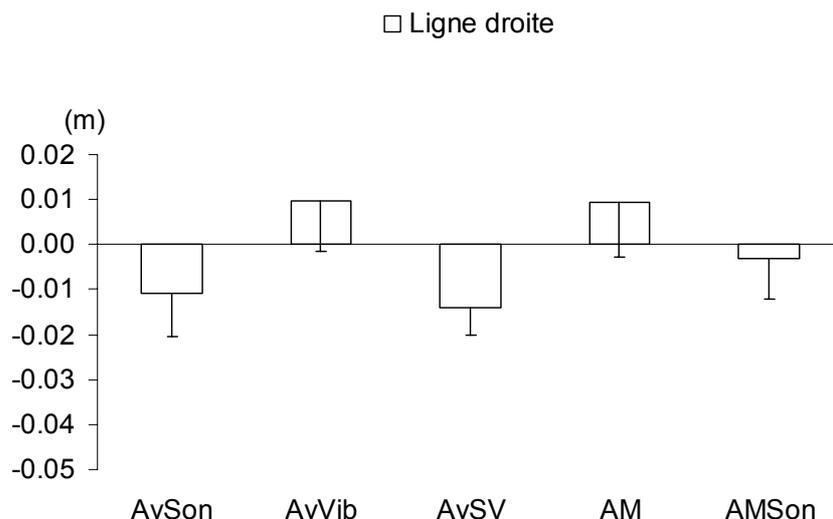


Figure 44. Effets des différents dispositifs d'assistance, relativement à la condition contrôle, sur la variabilité du positionnement latéral moyen en virage à droite. Zéro sur le graphique représente la valeur obtenue en condition contrôle (0.15 m). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

— Comparatif entre assistances

Les statistiques montrent l'absence de différence entre les divers dispositifs d'assistance évalués aussi bien en ligne droite ($F(4, 60) = 1.42, p = .24$) qu'en virages : à droite ($F(4, 60) = 1.99, p = .11$) et à gauche ($F(4, 60) = 0.41, p = .80$).

II.4 DISCUSSION

Cette première étude s'intéresse aux effets de différents dispositifs d'assistance sur l'activité de guidage du véhicule. Trois types de situations ont été analysés. La principale situation d'intérêt correspond aux situations critiques. Ici, les conducteurs étaient placés dans une situation de sortie de voie imminente. L'objectif était de comparer l'impact des différentes assistances sur les manœuvres de rétablissement sur la voie. Une situation de contournement d'obstacle a aussi été étudiée de manière à comparer les manœuvres de contournement sans assistance et avec chacune des assistances. Finalement, le comportement des conducteurs en conduite sans incident a été analysé, sans et avec chaque assistance. Ces analyses portant sur des situations dites nominales avaient pour objectif d'évaluer l'impact des diverses assistances sur l'activité de guidage du véhicule en général. Les résultats principaux indiquent une claire amélioration des manœuvres de rétablissement pour les situations critiques en présence d'une assistance, quelle qu'elle soit. Les assistances amorçage moteur (AM et AMSon) se sont montrées encore plus efficaces que les autres assistances. Les assistances ont peu perturbé les conducteurs lors de leurs manœuvres de contournement. Finalement, la conduite en situation nominale n'a pas été modifiée par la présence des assistances.

II.4.1 Situations critiques

Les résultats recueillis montrent une nette amélioration globale des performances. Ainsi, en situation critique, de larges réductions des durées de sorties de voie ont été observées, à la fois en lignes droites et en virages. Les effets les plus importants ont été enregistrés pour les dispositifs d'assistance amorçage moteur seul (AM) ou combiné avec un avertissement auditif (AMSon). En moyenne, les dispositifs AM et AMSon ont engendré des réductions de durées de sorties de voie de 815 ms en virages et de 467 ms en lignes droites. Les assistances avertissement (AvSon, AvVib et AvSV) ne diffèrent pas les unes des autres et se sont révélées être environ deux fois moins efficaces que les assistances amorçage moteur (AM et AMSon).

Une réduction des temps de réponse similaire a été enregistrée pour l'ensemble des dispositifs d'assistance. L'effet observé sur les temps de réponse peut être associé à la première étape de traitement d'un signal d'avertissement décrite comme l'alerte de l'individu (Rogers et al., 2000). Les temps de réponse représentent alors l'effet des assistances sur le niveau d'alerte des conducteurs. Malgré des caractéristiques différentes, en termes de site de stimulation et de modalité(s) sensorielle(s) impliquée(s), les différents dispositifs ne se sont pas distingués significativement les uns des autres à ce niveau. Ce résultat indique que l'initiation des manœuvres correctrices est influencée d'une manière similaire par les différents dispositifs d'assistance. L'intervention des assistances amorçage moteur (AM et AMSon) directement sur la colonne de direction du véhicule n'entraîne donc pas de réduction mécanique des temps de réponse. Par conséquent, la meilleure efficacité de ces dispositifs d'assistance sur la trajectoire globale ne s'explique pas par des temps de réponses plus court.

Il est possible de commencer à différencier les dispositifs d'assistance entre eux en considérant la vivacité des manœuvres de correction. L'énergie investie par les conducteurs dans le mouvement de volant correcteur de la trajectoire a été mis en évidence au travers de l'analyse des pics d'accélération au volant. Tous les dispositifs d'assistance ont entraîné une augmentation de la vivacité des réponses. Néanmoins, les assistances amorçage moteur (sans et avec l'avertissement auditif) ont donné lieu à des manœuvres plus vives que les autres assistances étudiées. Ces résultats suggèrent que l'effet des assistances amorçage moteur porte sur la qualité de la réponse corrective au volant dès que cette dernière a été initiée. Les mouvements de volant plus énergiques induits par l'assistance amorçage moteur résultent en des manœuvres de rétablissements plus efficaces (durées de sorties de voie réduites). Toutefois, une augmentation de la vivacité des réponses au volant pourrait résulter en des corrections trop importantes. L'analyse des surcompensations opérées par les conducteurs montre l'absence de différences entre les différents dispositifs d'assistance aussi bien

qu'entre chaque dispositif et la condition contrôle. Les assistances amorçage moteur n'ont donc pas donné lieu à des manœuvres trop brusques qui auraient pu se révéler dangereuses.

Il est important de préciser que le dispositif amorçage moteur n'entraîne de lui-même que des modifications minimales de la trajectoire. Par conséquent, ce dispositif d'assistance ne peut pas être considéré comme un système d'aide au maintien dans la voie. Dans le cas où un conducteur ne tiendrait pas son volant (où le tiendrait très légèrement) lors d'une lente dérive du véhicule vers un bord de voie (axe du véhicule presque parallèle au bord de voie), l'AM pourrait replacer lentement le véhicule dans sa voie. Néanmoins, lorsque le conducteur contrôle activement sa trajectoire, l'effet mécanique du dispositif d'AM (en excluant son influence sur le comportement des conducteurs) est négligeable et n'explique en rien les résultats obtenus dans cette expérience. En effet, lors de la négociation de virages, les conducteurs agissent sur le volant activement afin de suivre la courbure du virage et c'est précisément dans cette situation que les effets de l'AM se sont révélés être les plus importants. Par conséquent, les conducteurs ne peuvent pas confondre l'AM avec un dispositif correctif.

Tous les dispositifs d'avertissement (AvSon, AvVib et AvSV) évalués dans cette étude ont conduit à des améliorations similaires des manœuvres de rétablissement, et ce indépendamment de la modalité sensorielle mobilisée et de la présence ou non d'une indication sur le côté de sortie. L'indication du côté de sortie de voie n'était fournie qu'en présence de l'avertissement auditif (donc avec les dispositifs AvSon et AvSV). Des corrections au volant plus vives ont été observées avec le dispositif AvVib qu'avec le dispositif AVSon. Mais ces modifications sont restées sans incidence significative sur les manœuvres de rétablissement.

L'ajout d'une information auditive directionnelle à la stimulation vibro-tactile (AvSV) n'a pas permis de combler l'écart entre les dispositifs AvVib et AM. Par conséquent, fournir une information directionnelle via des systèmes d'avertissement aux sorties de voie, n'est pas plus bénéfique aux conducteurs qu'un avertissement non-directionnel. Suzuki et Jansson (2003) ont conclu de manière similaire, après avoir constaté des effets comparables entre un avertissement auditif directionnel et un avertissement auditif non-directionnel. Dans tous les cas, le dispositif d'avertissement alerte le conducteur qu'il lui est nécessaire d'entreprendre une action, mais cette action n'est très probablement effectuée qu'après un diagnostic visuel de la situation par le conducteur.

La combinaison de l'avertissement auditif avec l'AM et l'AvVib (AMSon et AvSV) n'a pas amélioré les comportements des conducteurs, en comparaison au dispositif considéré isolément. Dans la catégorisation de Wickens et Gosney (2003), ces résultats s'inscrivent dans la catégorie « meilleur des deux mondes », les performances enregistrées avec le dispositif multimodal étant comparables à celles recueillies avec le dispositif unimodal le plus

performant. Les deux combinaisons multimodales testées dans notre étude vont à l'encontre de l'idée selon laquelle des dispositifs multimodaux seraient bénéfiques dans des situations de conduite dangereuses. L'utilité de dispositifs multimodaux n'est toutefois pas à exclure pour d'autres configurations.

En tenant compte de l'ensemble des résultats obtenus, il apparaît que l'amorçage moteur a un effet important sur la manière dont est réalisée la manœuvre de rétablissement du véhicule sur sa voie. L'hypothèse d'une intervention du dispositif d'AM au niveau de l'action, produite via la transmission d'informations haptiques directionnelles au niveau des mains, a été émise. Cette intervention différerait donc de celle des assistances de type avertissement, agissant comme une aide au diagnostic de la situation. Le dispositif d'AM interviendrait donc au même niveau que les systèmes d'aide au maintien dans la voie, supposés être les plus intrusifs, tout en conservant les avantages des systèmes d'avertissement aux sorties de voie (SAS). Avantages principalement liés au fait que ces dispositifs n'interviennent pas mécaniquement dans le contrôle de la trajectoire du véhicule. Ces dispositifs laissent donc les conducteurs seuls maîtres de la gestion mécanique de la trajectoire.

De tels effets ont déjà été observés notamment par Suzuki et Jansson (2003). Ces auteurs ont évalués différents type d'assistance SAS, dont une assistance proche de l'amorçage moteur. Ces auteurs rapportent que certains conducteurs ont contré le dispositif d'assistance proche de l'amorçage moteur aggravant leur sortie de voie au lieu d'y remédier. Ce comportement allant à l'encontre des objectifs du dispositif a été observé chez 50 % des conducteurs lorsqu'ils n'étaient pas avertis de la présence du dispositif d'assistance. Cette correction au volant allant à l'encontre du dispositif d'assistance a été comparée à une réponse des conducteurs faisant suite à une perturbation latérale, comme une rafale de vent latérale. Dans notre étude, aucune correction au volant allant à l'encontre du dispositif d'AM n'a été observée. L'assistance AM s'est donc convenablement intégrée dans les boucles de contrôle sensori-motrices. Les différences observées entre les deux études pourraient être attribuées à la forme triangulaire de la stimulation (Figure 19b) utilisé pour l'assistance amorçage moteur, tandis que Suzuki et Jansson (2003) ont utilisé une stimulation de forme rectangulaire (Figure 16). Il est probable que la forme triangulaire de la stimulation soit plus progressive qu'une forme rectangulaire, et donc s'insère mieux dans les boucles de régulations sensori-motrices.

L'hypothèse d'une intervention directe au niveau de l'action ne signifie pas qu'en présence de l'AM les conducteurs ne réalisent pas le diagnostic de la situation. Comme avec les dispositifs d'avertissement, les conducteurs étaient capables de prendre en compte des éléments contextuels dans leur environnement lorsque le véhicule se situait dans une position dangereuse sur la voie. En ligne droite, les effets des dispositifs d'assistance étaient

plus importants pour les sorties de route que pour les sorties menant les conducteurs sur la voie de circulation opposée. Cette différence est peut-être explicable par le fait que les conducteurs avaient la possibilité de voir l'absence de trafic sur la voie de circulation opposée à la fin de l'occlusion visuelle. Ainsi, une sortie de route était considérée comme plus dangereuse que de se trouver dans la voie de circulation opposée ; les conducteurs évitant de conduire sur l'accotement de la route à cause des risques de perte d'adhérence importants associés.

En virage, un effet opposé à celui recueilli en lignes droites a été observé. Lorsque le véhicule entrait dans la voie de circulation opposée (sortie à gauche), l'effet des assistances était légèrement plus important que pour les sorties de route (sortie à droite). Cette apparente contradiction pourrait être le fait du champ visuel horizontal limité offert par le simulateur (62°). En virage la route située devant le véhicule est visible uniquement sur une distance limitée. L'éventualité de l'arrivée soudaine d'un véhicule sur la voie de circulation opposée impliquait un fort risque de collision. Les conducteurs ont donc estimé le risque associé à un écart sur la voie opposée (collision) comme plus important que le risque de sortir de la route, où aucun obstacle n'était présent. Il convient cependant d'être prudent quand à l'interprétation du sens de ces effets dans la mesure où, sorties à droite et sortie à gauche n'ont pas été effectuées dans des virages identiques.

Un des rôles des dispositifs d'assistance était d'informer les conducteurs du danger imminent. Une différence dans la perception du risque, en fonction du contexte, pourrait avoir modulé les effets des dispositifs d'assistance sur les manœuvres de rétablissement. Ce résultat n'est pas surprenant en ce qui concerne les assistances avertissement. En effet, ces assistances tendent à améliorer le diagnostic de la situation qui intègre la prise en compte de la perception du risque. Mais il est également apparu que le comportement global des conducteurs était modulé en fonction du risque perçu y compris pour les assistances de type amorçage moteur. Les effets de la perception du risque ont principalement été observés sur les durées de sortie de voie, suggérant que la modulation des comportements sur la base de l'évaluation du risque prendrait place à la fin des manœuvres de rétablissement. Cette interprétation, en termes de risques perçus, est spéculative et devra être confirmée par des études spécialement conçues pour évaluer l'importance de ce facteur.

II.4.2 Situations de contournement et situation nominale

Ces deux situations d'intérêt avaient pour objectif d'évaluer les comportements des conducteurs dans des conditions auxquelles les assistances ne sont pas directement destinées.

- **Situations de contournement**

La situation de contournement impliquait que les conducteurs franchissent le centre de la route et donc passent outre les informations transmises par le dispositif d'assistance lorsque celui-ci était présent. De manière générale, les assistances évaluées dans cette étude n'ont pas entraîné de manœuvres de contournement plus risquées que celles enregistrées en condition contrôle. Compte tenu de l'intervention directe de l'assistance amorçage moteur au niveau de l'action, ce dispositif d'assistance aurait pu nuire au contournement de l'obstacle. Les résultats obtenus montrent que ce n'est pas le cas ; les assistances AM ne se différencient pas des dispositifs d'avertissement utilisés dans notre étude (qui agissent eux au niveau du diagnostic de la situation).

L'initiation des manœuvres de contournement (caractérisée par le temps de pré-contact) était comparable en présence d'une assistance, quelle qu'elle soit. L'initiation du contournement n'était d'ailleurs que très marginalement modifiée par la présence des assistances. Seules les assistances AvVib et AM, et en lignes droites uniquement, retardaient légèrement le déclenchement du contournement.

Les résultats portant sur l'écart latéral maximal opéré sur la voie de circulation opposée (voie de gauche) indiquent que la taille de l'écart réalisé lors du contournement n'est pas modifiée par la présence d'une assistance quelle qu'elle soit. L'amplitude de l'écart comparable entre toutes les assistances évaluées, indique l'absence de décalage latéral plus important et des risques associés (ex. : sortie de voie ou perte de contrôle).

En présence des assistances, la durée des contournements n'a pas été réduite pour les contournements en virages (sauf pour le dispositif AvSon). En revanche, cette durée a été réduite pour les contournements réalisés en lignes droites (réduction significative pour les dispositifs AvVib, AM et AMSon). La réduction observée en ligne droite est homogène entre les différentes assistances évaluées (pas de différence entre les différents dispositifs). Il est à noter qu'en condition contrôle les durées de contournement sont plus longues de 520 ms en ligne droite qu'en virage. Du fait de l'absence de trafic sur la voie de circulation opposée lors des situations de contournement et d'une bonne visibilité de cette absence en ligne droite, les conducteurs effectuent un retour dans la voie de circulation plus lent qu'en virage. La présence des assistances réduit la différence entre les durées de contournement en virage et en ligne droite. En ligne droite, les conducteurs passent donc moins de temps sur la voie de circulation opposée, sans pour autant adopter des comportements plus risqués. Les durées de contournement recueillies en ligne droite avec assistance sont similaires à celles recueillies en virage (avec ou sans assistance).

Pour conclure, l'absence de difficultés à éviter un obstacle obligeant à franchir le centre de la chaussée indique que l'effet initial des dispositifs d'assistance, y compris d'amorçage moteur, peut être inhibé par un diagnostic contradictoire de la situation de telle façon que les

conducteurs n'entreprennent pas de manœuvres qui pourraient s'avérer dangereuses et inadaptées à la situation.

- **Situation nominale**

L'analyse de la situation nominale avait pour objectif de déterminer si la présence d'une assistance avait une influence sur les comportements des conducteurs, même lorsqu'elle n'était pas active. Nous souhaitons donc nous intéresser à l'apparition d'éventuelles adaptations comportementales en dehors des périodes d'activité des assistances considérées. Les résultats montrent que les conducteurs ont adopté des comportements assez similaires avec et sans assistance.

Avec un dispositif d'assistance, les vitesses de conduites spontanées n'ont pas été modifiées significativement en comparaison à la condition sans assistance, à l'exception d'une très légère augmentation de vitesse en ligne droite avec l'assistance AvSV. Globalement, la vitesse choisie par les conducteurs est indépendante d'une assistance (quelle qu'elle soit). De la même manière, la variabilité de la position latérale n'a été que peu affectée par la présence d'un dispositif d'assistance. Seul le virage à droite, avec les dispositifs AvSon et AvSV, présente des modifications significatives comparativement à la condition contrôle. Concernant le positionnement latéral moyen du véhicule dans sa voie de circulation, aucun effet n'a été observé ni en ligne droite ni en virage à gauche. Pour le virage à droite en revanche, trois SAS (AvSon, AvSV et AMSon) ont modifié significativement le positionnement latéral moyen des conducteurs. Indépendamment du sens, les conducteurs ont eu tendance à « couper » les virages et donc à se placer à l'intérieur du virage. En virage à droite, avec l'ajout d'une assistance contenant un avertissement sonore, les conducteurs se sont repositionnés latéralement vers le centre de la voie, sans pour autant l'atteindre. Il est probable que ce repositionnement ait été dicté par la volonté de ne pas activer involontairement l'assistance et ainsi d'éviter une nuisance sonore.

L'impact de la présence d'un dispositif d'assistance de type SAS sur les activités de guidage du véhicule, même s'il n'est pas nul, est très limité. Lorsqu'un dispositif d'assistance est présent mais non actif (ne délivrant aucun signal), aucune adaptation comportementale négative significative, au niveau du guidage du véhicule, n'a été avérée.

II.5 CONCLUSION

Les résultats, obtenus au cours de cette première étude, indiquent la supériorité du dispositif d'assistance amorçage moteur sur les dispositifs d'avertissements simple lors des manœuvres de récupération faisant suite à une sortie de voie imminente. Les dispositifs d'avertissement simple se sont toutefois révélés améliorer les manœuvres de récupération en comparaison à une situation sans assistance. Par ailleurs, les dispositifs d'amorçage moteur comme ceux d'avertissement simple n'ont pas produit d'adaptations comportementales

négatives. Et ce, aussi bien pour des situations d'invalidité de l'assistance (contournement d'obstacles) qu'en situation de conduite nominale, où les assistances n'étaient pas en fonctionnement. Cette première étude indique qu'il n'y a pas d'adaptions comportementales à court terme après l'introduction de dispositifs d'avertissement aux sorties de voie. D'éventuelles adaptations comportementales pourraient toutefois faire leur apparition après de plus longues périodes d'utilisation des dispositifs. Le principal résultat de cette étude est la mise en évidence de la supériorité du dispositif amorçage moteur sur les dispositifs d'avertissement simple. L'hypothèse d'une intervention directe de l'amorçage moteur au niveau de l'action est confortée par ces résultats. Le principal intérêt de l'étude suivante sera d'essayer d'aller plus avant dans la compréhension des mécanismes sous-tendant l'efficacité de l'assistance amorçage moteur.

III. EXPERIENCE 2 : VERS UNE MEILLEURE COMPREHENSION DE L'EFFICACITE DE L'AMORÇAGE MOTEUR ET PREMIERS ELEMENTS SUR SON ACCEPTABILITE COMPARATIVEMENT AUX SYSTEMES D'AVERTISSEMENTS AUX SORTIES DE VOIES

Publié dans :

Navarro, J., Mars, F., Forzy, J.F., El-Jaafari, M., et Hoc, J.M. (sous presse). Objective and subjective assessment of warning and motor priming assistance devices in car driving. *Proceedings of the European Chapter of Human factors and ergonomic society*, Braunschweig, Germany.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le groupe ergonomie cognitive et le centre technique de simulation de Renault. Cette collaboration a été réalisée principalement avec Jean-François Forzy et Myriam El-Jaafari du groupe ergonomie cognitive, dont les intérêts se sont portés sur l'évaluation subjective des dispositifs d'assistance. En particulier, ces deux personnes ont réalisé l'analyse des données issues de l'évaluation subjective des dispositifs d'assistance. David Toffin, du centre technique de simulation, nous a fourni toute l'assistance technique nécessaire au bon déroulement de la simulation, ainsi que l'ensemble des renseignements nécessaires à l'analyse des données objectives.

III.1 INTRODUCTION

L'objectif principal de cette deuxième expérimentation était d'affiner la compréhension des mécanismes mis en jeu avec le mode d'assistance amorçage moteur et donc la coopération homme-machine sous-jacente. Cette étude a été conçue pour dissocier avec précision les différents éléments constitutifs de l'assistance amorçage moteur évaluée lors de l'étude précédente, afin d'en comprendre l'importance relative dans l'amélioration des performances enregistrées. Diverses raisons peuvent expliquer la plus grande efficacité de l'assistance amorçage moteur en rapport aux autres assistances SAS. L'assistance amorçage moteur se caractérise par une stimulation directe du système moteur, au niveau de l'effecteur de la réponse attendue (le volant) et au travers de la modalité haptique. Afin de déterminer l'importance relative de chacune de ces caractéristiques sur l'effet global observé lors des manœuvres de rétablissement, une approche de comparaison « en cascade » a été adoptée.

Premièrement, les résultats de l'étude précédente ont conduit à formuler l'hypothèse d'un niveau d'intervention différent dans la hiérarchie des processus de traitement de l'information. Selon que l'assistance fournisse un amorçage moteur ou un simple avertissement, elle améliore le diagnostic de la situation ou agit directement au niveau de la mise en œuvre de l'action. L'assistance amorçage moteur tirerait avantage d'un effet direct

au niveau de l'action des conducteurs en les amenant à mieux réagir à la situation dans laquelle ils se trouvent. Ce bénéfice émanerait de son caractère incitatif. Afin de confirmer cette hypothèse, il convient de comparer le mode d'assistance amorçage moteur avec une assistance identique en tout point, excepté le caractère incitatif. Lors de l'expérimentation précédente, l'AM a été comparé à un avertissement vibratoire (AvVib ; consistant en une vibration symétrique du volant). Les résultats ont révélé un net avantage de l'AM. Néanmoins, ces deux modes différaient également, de par le fait que l'AvVib ne fournissait pas d'indication sur le sens de sortie de voie, au contraire de l'AM. Dans cette étude, l'AM sera comparé à une assistance véhiculant l'information par le canal haptique, agissant sur le volant et contenant une information sur le côté de sortie de voie (vibration latéralisée au volant), mais sans l'indice moteur propre à l'AM.

Deuxièmement, le site de stimulation de l'assistance peut différer selon le dispositif considéré. Ainsi l'amorçage moteur, tout comme la vibration latéralisée du volant, agissent directement sur l'interface qui permet au conducteur de réguler sa position latérale et la direction du véhicule. L'avantage potentiel d'une stimulation directe de l'organe effecteur s'applique dans le domaine du contrôle longitudinal, au travers du concept de pédale active (Hjälmdahl & Varhelyi, 2004 ; Varhelyi et al. 2004). Il s'agit de stimuler le pied au contact de l'accélérateur pour inciter le conducteur à réduire sa vitesse. La contiguïté spatiale entre la stimulation et les mains pourrait expliquer en partie les meilleures manœuvres de rétablissement observées avec l'amorçage moteur. Pour déterminer l'importance de ce facteur, il convient de comparer une assistance agissant sur le volant à une assistance identique en tout point mais agissant sur un autre site de stimulation. Cette question sera abordée à travers la comparaison d'un avertissement vibratoire latéralisé au volant et d'un avertissement vibratoire latéralisé sur le siège.

Troisièmement, l'amorçage moteur utilise le canal haptique pour délivrer son message. Les assistances appartenant à la catégorie SAS utilisent traditionnellement la modalité auditive (Rimini-Doering et al., 2005 ; Sayer et al., 2005 ; Suzuki & Jansson, 2003). L'avantage de l'AM pourrait donc également résider en partie dans la supériorité de la modalité haptique sur la modalité auditive pour initier une réponse du conducteur. Dans certaines tâches, fournir une information sensorielle via la modalité haptique s'est d'ailleurs avéré plus efficace et plus intuitif que de fournir cette même information via une autre modalité sensorielle (Sklar & Sarter, 1999 ; Van Erp & Van Veen 2004). Cependant, des résultats plus contrastés ont été rapportés pour l'assistance au contrôle latéral (Sayer et al. 2005 ; voir cadre général, III.3.2 partie acceptabilité). Pour essayer de répondre à la question du poids de la modalité sensorielle utilisée sur les performances recueillies, il convient de comparer un avertissement vibratoire latéralisé n'intervenant pas directement sur le volant (siège vibrant) avec un avertissement sonore latéralisé. L'objectif est de savoir si de réelles différences entre modalités sensorielles peuvent être observées lors d'une situation critique en conduite

automobile et, si tel est le cas, dans quelle proportion l'utilisation de la modalité haptique participe à la plus grande efficacité de l'assistance amorçage moteur comparativement aux modes avertissement.

Le deuxième objectif de cette expérience était d'explorer l'acceptabilité des SAS. Plus particulièrement, nous souhaitions recueillir les premiers éléments permettant de qualifier l'acceptabilité relative du dispositif AM par rapport aux autres dispositifs d'assistance de type SAS. Le caractère clairement exploratoire de l'évaluation subjective de l'acceptabilité des assistances que nous avons menée, constitue un premier pas vers l'évaluation de l'acceptabilité des dispositifs d'assistance. Évaluation de première importance, car même la plus efficace des assistances n'est d'aucune utilité si les conducteurs n'ont fait pas usage. Et les dispositifs d'assistance bien acceptés ont tendance à être plus utilisés que ceux qui le sont moins. Par exemple, Young et Regan (2007) montrent que les conducteurs utilisent plus fréquemment leur régulateur de vitesse lorsqu'ils présentent des attitudes plus favorables vis-à-vis du dispositif d'assistance.

Par ailleurs, l'acceptabilité d'un dispositif d'assistance n'est pas nécessairement déterminée par son efficacité. Par exemple, Ho et al. (2006) rapportent que l'utilisation d'un avertissement spécifique correspondant à un danger spécifique n'est pas plus efficace que l'utilisation d'un avertissement non spécifique au danger considéré. Cependant, les conducteurs ont jugé moins acceptable l'avertissement non spécifique au danger que l'avertissement spécifique au danger. Par conséquent, deux dispositifs ayant un niveau d'efficacité comparable peuvent être jugés distinctement en termes d'acceptabilité.

Deux études s'intéressant au régulateur de vitesse ont montré une moindre utilisation du dispositif d'assistance (Young & Regan, 2007) ou une dégradation de son acceptabilité (Comte et al., 2000) lorsque les conducteurs n'avaient plus le sentiment d'être en contrôle du véhicule. De plus, les jugements des conducteurs ne sont pas favorables à des assistances à la conduite agissant sur le volant (Lefevre, Bordel, Guingouain et al., 2004). En raison de son intervention sur le volant (organe de contrôle principal du véhicule) et du caractère incitatif de la vibration volant générée, une plus faible acceptabilité du dispositif AM comparativement aux autres SAS est donc attendue.

De manière à améliorer la moindre acceptabilité attendue du dispositif d'AM, la combinaison de l'AM avec un autre dispositif (avertissement sonore) a été envisagée. L'expérience 1 a montré l'absence de bénéfices en termes d'efficacité pour cette combinaison multimodale, en revanche, une différence d'acceptabilité est plausible. Le traitement des informations sensorielles est connu pour reposer sur l'association de la perception d'un événement et la connaissance préalable d'événements similaires. La signification d'un signal d'avertissement (tel que le bruit d'un avertisseur sonore) est plus facilement accessible si ce signal d'avertissement est familier (Wickens & Hollands, 2000). Par conséquent un

avertissement auditif, imitant le bruit d'un passage sur des bandes rugueuses, est probablement mieux acceptable de par son caractère familier qui le rend plus facilement accessible et donc facile à traiter. Pour les situations de sortie de voie, le bruit de passage sur des bandes rugueuses renvoie effectivement à une situation réelle bien connue. En situation de sortie de voie un bruit de roulement sur des bandes rugueuses s'est d'ailleurs révélé être plus acceptable qu'un son abstrait (Ziegler et al., 1995). La combinaison du dispositif AM avec un avertissement sonore de type bruit de passage sur des bandes rugueuses pourrait donc être un dispositif d'assistance optimal autorisant la meilleure efficacité (via l'amorçage moteur) et la meilleure acceptabilité (via l'avertissement sonore).

Pour cette deuxième étude, nous avons également souhaité mettre les conducteurs dans des situations de conduite proches de la réalité. Dans ce but, un simulateur de conduite plus performant a été utilisé (base mobile, habitacle complet, large angle de vue). Toujours dans l'optique de se rapprocher de situations de conduite réelles, la procédure expérimentale pour créer les situations de sortie de voie a été modifiée. Comme les chiffres émanant de l'accidentologie le montrent, l'origine des sorties de voie entraînant des accidents réside souvent dans un défaut d'attention ou dans la distraction des conducteurs. Afin de se rapprocher de cette situation, les situations critiques ont été introduites via une tâche de lecture sur un écran situé dans l'habitacle du véhicule. Cette tâche assez proche d'une situation où le conducteur s'affère à une tâche secondaire, comme la manipulation de l'autoradio, regroupe trois des quatre formes de distraction principales (distraction visuelle, distraction physique et distraction cognitive).

III.2 METHODES

III.2.1 *Participants*

Vingt personnes (4 femmes et 16 hommes) se sont portées volontaires pour prendre part à cette expérience. Les conducteurs étaient âgés de 23 à 52 ans, avec une moyenne d'âge de 34 ans. L'expérience de conduite des participants variait entre 4 et 35 ans (16 ans en moyenne). Tous avaient une vue normale ou corrigée. Aucun n'a été victime du mal du simulateur.

III.2.2 *Simulateur*

Cette expérience a été menée sur le simulateur à base mobile Cards2 développé par le Centre Technique de Simulation de Renault. Le simulateur est constitué d'un habitacle de voiture réel monté sur une plate-forme électromécanique à six degrés de liberté. La plate-forme mobile utilise des vérins électromécaniques pouvant générer des accélérations effectives allant jusqu'à 0.5 g, ainsi que des courses d'une vingtaine de centimètres sur les trois axes linéaires et d'une vingtaine de degrés sur les trois axes angulaires. Ces performances permettent de se rapprocher des sollicitations rencontrées en conduite normale. La scène

visuelle était projetée sur trois écrans offrant un champ visuel horizontal de 150°. Le simulateur était équipé de toutes les fonctionnalités et commandes habituellement disponibles dans un véhicule, ce qui inclut une boîte de vitesse manuelle, un volant et un pédalier à retour d'efforts, ainsi qu'un compte-tour et un compteur de vitesse. La simulation était gérée grâce au logiciel de simulation SCANeR© II. Ce logiciel permettait la génération d'images, la modélisation dynamique du véhicule, la génération de trafic, la génération sonore et la commande de plate-forme mobile.

La base de données visuelle utilisée était la modélisation d'une route de type départementale d'une longueur d'environ 3.9 km (Figure 45).

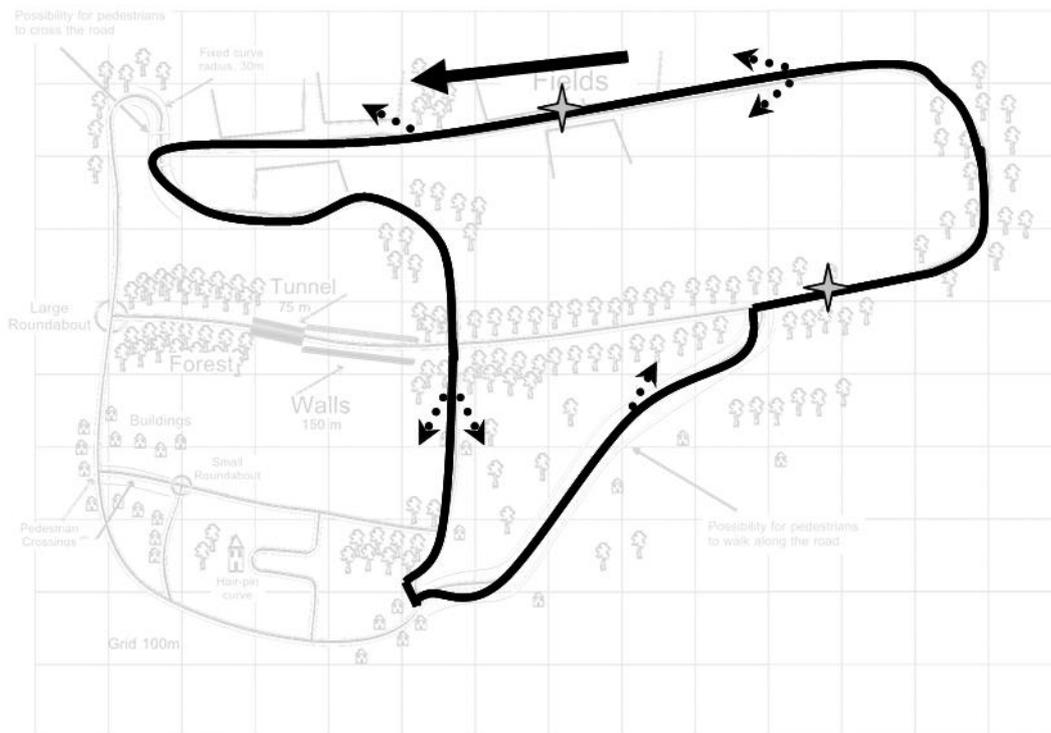


Figure 45. Tracé de la piste utilisée et endroits choisis pour la survenue des situations critiques (flèches pointillées). Les deux étoiles grises marquent les endroits de survenue de tâches de lecture sans sortie de voie. La flèche pleine indique le sens de circulation.

III.2.3 Dispositifs d'assistance à la conduite

Cinq dispositifs d'assistance au contrôle latéral ont été utilisés lors de cette expérience. Toutes ces assistances entraînent en fonctionnement lorsque le centre du véhicule dépassait un seuil situé à 85 cm du centre de la voie. Les assistances restaient en état de fonctionnement jusqu'au moment où le centre du véhicule repassait sous le seuil de 85 cm.

- L'amorçage moteur (AM) entraînait une vibration asymétrique de forme triangulaire du volant, avec un couple de force appliqué au volant de 2 Nm dans la direction du centre de la voie, et un couple de force de 0.5 Nm dans la direction de la sortie de voie. La durée d'un cycle (couple de force dans un sens puis dans l'autre) était de 300 ms.
- L'avertissement vibration volant latéralisée (AvVol) générait la vibration de la partie du volant correspondant au côté de sortie de voie. Cette vibration était générée grâce à deux vibreurs placés dans la partie haute du volant. Lorsque les conducteurs avaient les mains sur le volant en position 10h10, les vibreurs étaient placés immédiatement sous les mains. Afin d'éviter la propagation de la vibration d'un côté à l'autre du volant, les parties gauche et droite du volant étaient séparées physiquement (séparation non visible par les conducteurs).
- L'avertissement vibration siège latéralisée (AvSiège) produisait une vibration du siège du conducteur. Seule la moitié du siège située du côté de la sortie de voie entraînait en vibration. Cette vibration était générée par deux vibreurs, l'un positionné dans le dossier et l'autre dans l'assise.
- L'avertissement sonore latéralisé (AvSon) produisait un son du côté de la sortie de voie, ce son imitant le bruit d'une bande rugueuse était émis par un des deux haut-parleurs situés dans les portières du simulateur.
- L'amorçage moteur et l'avertissement sonore latéralisé (AMSon) consistaient en la combinaison des modes AM et AvSon.

Enfin, une condition sans assistance (SA) a été mise en place pour servir de condition contrôle.

III.2.4 Tâche de lecture

La tâche consistait à lire des séries de six mots. La liste de mots était renouvelée chaque seconde. La consigne donnée aux conducteurs était de lire le plus de mots possibles, sans se soucier de la position du véhicule pendant ce temps de lecture. Les mots à lire étaient présentés sur un écran TFT de 11 pouces fixé sur le tableau de bord, à la place habituellement occupée par l'autoradio. La position de cet écran était suffisamment basse pour éviter que le conducteur ne puisse à la fois lire et voir la route en vision périphérique. Les mots à lire étaient générés de façon aléatoire à partir d'une base de données de 200 mots.

Cette tâche de lecture pouvait être utilisée afin de provoquer des situations dites critiques, c'est-à-dire mettant les conducteurs en situation de sortie de voie. Le conducteur était averti du début de la tâche par un signal auditif. La tâche de lecture débutait deux secondes après l'émission de ce signal. Pour les cas où une sortie de voie était souhaitée, la trajectoire du véhicule était légèrement modifiée, à l'insu des conducteurs, dans le but d'entraîner une sortie de voie du côté voulu. La modification de la trajectoire était obtenue par l'application

d'une force latérale sur le modèle du véhicule. Cette force était équivalente à une rafale de vent augmentant de façon linéaire pendant une seconde, de 0 à 135 km/h en lignes droites, et de 0 à 70 km/h en virages. La tâche de lecture prenait fin (disparition des mots à l'écran) lorsque le véhicule se trouvait être au seuil de déclenchement des assistances. Pour éviter que chaque tâche de lecture ne conduise à une sortie de voie, certaines tâches de lecture d'une durée prédéterminée de 2 secondes ne donnaient pas systématiquement lieu à une sortie de voie (Figure 45).

III.2.5 Procédure

Avant de prendre part à l'expérimentation en elle-même, les participants se rendaient une première fois dans la salle de simulation. Cette première séance d'une vingtaine de minutes avait plusieurs objectifs. Le premier était d'informer les participants des conditions de passation de l'expérimentation et, s'ils les acceptaient, de leur faire signer un document attestant du fait qu'ils étaient volontaires et qu'ils avaient pris connaissance des conditions de déroulement de l'étude. Cette première étape validée, les participants réalisaient deux tours de piste afin de se familiariser avec le simulateur de conduite. Après explication et démonstration de ce qui était attendu pour la tâche de lecture, les participants réalisaient un troisième tour pour se familiariser avec cette tâche en conduite. Enfin, les conducteurs expérimentaient chacun des dispositifs d'assistance à la conduite, véhicule à l'arrêt. L'expérimentateur expliquait le principe de chaque assistance, puis faisait essayer les différentes assistances autant de fois que le conducteur le souhaitait.

Lors de la deuxième venue des participants dans la salle expérimentale, l'expérimentation proprement dite, était réalisée. Cette deuxième phase durait environ 1h30 et consistait en la réalisation de 10 tours de circuit, suivie d'un entretien semi-directif. Chaque dispositif d'assistance était activé sur le véhicule pour un tour complet. L'expérience comprenait 5 tours assistés. Chaque tour assisté était alterné avec un tour sans assistance. L'ordre de présentation des différents dispositifs d'assistance a été contrebalancé entre les participants (voir annexes pour la présentation du plan expérimental). Après chaque tour assisté, les conducteurs étaient brièvement questionnés au sujet du dispositif qu'ils venaient d'expérimenter via la question suivante : « Pouvez-vous me décrire rapidement ce qui s'est passé pour vous au moment des sorties de voie ? Quand vous avez perçu le signal de sortie, comment l'avez-vous perçu ? Qu'est ce que ça a provoqué ? Comment l'avez vous vécu ? Ou tout autre chose qui s'est passée pour vous à ce moment-là. »

Les conducteurs avaient pour consigne de conduire sur la voie de droite de la route, de respecter les limitations de vitesse présentes et de garder les deux mains sur le volant dans une position qui soit proche de la position 10h10. Chaque tour accompli avec assistance comportait quatre situations critiques introduites par la tâche de lecture (voir Figure 45).

Tous les tours avec assistance étaient donc ponctués par quatre situations critiques, deux précédant l'entrée en virages et deux survenant en ligne droite. Tous les tours sans assistance (au nombre de 5) comportaient au moins deux situations critiques, l'une en entrée de virage et l'autre en ligne droite. Parmi les tours sans assistance, trois comprenaient une tâche de lecture (voir Figure 45) ne menant pas systématiquement à sortie de voie et ce, en plus des deux situations critiques. Le dernier des tours sans assistance réalisé par les conducteurs comprenait quatre situations critiques comme les tours avec assistance.

Les situations critiques provoquées à l'entrée du virage à droite entraînaient des sorties de voie vers la gauche (donc sur la voie de circulation opposée ; Figure 21). Les situations critiques provoquées à l'entrée des virages à gauche entraînaient quant à elles des sorties de voie vers la droite (donc des sorties de route ; Figure 21). En lignes droites, les sorties pouvaient être orientées vers la gauche ou vers la droite.

Au cours de l'expérience, un trafic était présent sur la voie de circulation inverse. Les conducteurs croisaient ainsi approximativement 4 véhicules par kilomètre, tous se déplaçant à une vitesse de 50 km/h. Toutefois, les scénarios expérimentaux étaient agencés de manière à ce qu'aucun véhicule ne soit présent sur la voie de circulation opposée immédiatement avant ou après les tâches de lecture. De cette façon, les conducteurs n'ont jamais eu à gérer de collision.

Après la conduite, un entretien semi-directif a été mené en utilisant une méthode destinée à amener les conducteurs à expliciter la manière dont ils ont géré les situations critiques. L'entretien était ouvert mais a aussi été guidé par des relances inspirées par les techniques d'explicitation (Vermersch, 1994). L'objectif était de faire verbaliser le conducteur sur ses actions (physiques et mentales) effectivement réalisées. Les techniques d'explicitation ont permis d'« aider l'utilisateur à décrire son activité telle qu'elle s'est déroulée en situation, soit ce qu'il a fait, perçu, pensé et ressenti pendant la situation [...] » (Cahour, 2006, p.3). L'idée étant d'aider le conducteur à décrire sa propre activité et de recueillir des éléments sur les sensations, les ressentis, les états internes, les pensées, vécus pendant la conduite assistée.

Il a finalement été demandé aux conducteurs de classer l'ensemble des dispositifs d'assistance par ordre de préférence, sans ex-æquo.

III.2.6 Analyse des données

- **Données objectives**

Pour évaluer les performances des conducteurs, les mêmes variables dépendantes que celles adoptées pour la première expérience ont été analysées. Toutes portent sur les comportements des conducteurs alors qu'ils se trouvent en situation critique. La variable d'intérêt principal est le temps passé par les conducteurs au-delà du seuil de 85 cm par

rapport au centre de la voie, utilisé pour déclencher les assistances et mettre un terme à la tâche de lecture. Ce temps, appelé durée de sortie de voie, permet de décrire le comportement global des conducteurs. Les temps de réponse ont également été calculés afin de qualifier la réactivité des conducteurs suite à une sortie de voie. Cette variable correspond au temps qui sépare le franchissement du seuil de déclenchement des assistances du moment où les conducteurs initient un mouvement de volant. Les pics d'accélération au volant, lorsque le conducteur corrige la trajectoire de son véhicule après avoir terminé la tâche de lecture, ont également été analysés. Cette variable est utilisée pour déterminer la vivacité de la correction au volant. Finalement, la taille des surcompensations, en termes de position latérale, a été étudiée. Les surcompensations correspondent à l'écart latéral maximum que font les conducteurs du côté opposé à celui de la sortie de voie, suite à la manœuvre de correction.

L'effet de chaque assistance a été évalué en rapport à la condition contrôle à l'aide de tests *t de Student*. Les tables de résultats présentent les effets observés qui correspondent à la différence entre la valeur moyenne de chaque assistance et la valeur obtenue en condition contrôle.

Les données obtenues en condition contrôle (sans assistance) ont ensuite été soustraites, essai par essai, des données obtenues avec l'utilisation des différentes assistances évaluées. Toutes les ANOVAs ont ainsi été réalisées sur les effets des différentes assistances (AvSon, AvVol, AvSiège, AM et AMSon). Le test de Newman-Keuls a été utilisé pour les comparaisons post-hoc. Un seuil de significativité de .05 a été utilisé pour tous ces tests.

Ces statistiques ont été complétées par une analyse d'inférence fiduico-bayésienne (voir Lecoutre & Poitevineau, 1992 et Rouanet, 1996). Ces statistiques permettent d'inférer la taille de l'effet sur la population de référence (δ) et ce, à partir des effets observés (d). Un seuil de garantie (probabilité) de .90 a été utilisé pour calculer ces tailles d'effet (cf. expérience 1, partie II.2.5 pour plus de détails sur la méthode).

- **Données subjectives**

L'ensemble des analyses subjectives a été mené sur 18 des 20 participants, les données relatives à deux participants ayant été perdues suite à un problème technique. L'analyse des verbalisations a été réalisée par Myriam El-Jaafari et Jean-François Forzy du groupe ergonomie cognitive de chez Renault.

Le classement par ordre de préférence des différents dispositifs d'assistance a été analysé statistiquement à l'aide d'un test de Friedman.

Après que les verbalisations aient été retranscrites, une analyse de contenu a été réalisée. Dans un premier temps, les verbalisations des conducteurs ont été catégorisées en commentaires positifs ou négatifs relatifs à chaque dispositif d'assistance. Dans un deuxième

temps, quatre dimensions ont été distinguées dans le discours des conducteurs relatif aux assistances (ressenti, interprétation du signal, utilité perçue et attitudes). L'ensemble des verbalisations a été classé selon ces quatre catégories, sachant que plusieurs verbalisations formulées par un même conducteur et concernant une de ces quatre dimensions (positivement ou négativement), n'était comptabilisé qu'une seule fois. Finalement, les verbalisations recueillies pour chaque dispositif d'assistance ont été analysées de manière plus qualitative afin d'éclairer le classement par rang effectué par les conducteurs. Dans tous les cas, c'est le contenu des verbalisations qui a fait l'objet de notre analyse et non pas les verbalisations en elles-mêmes.

III.3 RESULTATS

III.3.1 Données objectives

- **Durées de sorties de voie**

- Comparaison à la condition contrôle

En **lignes droites**, la valeur moyenne des durées de sorties en condition sans assistance est de 2.79 s. Trois assistances (AvVol, AM et AMSon) réduisent significativement les durées de sorties de voie (Tableau 17) en comparaison à la condition contrôle. Les deux autres assistances (AvSon et AvSiège) engendrent également des réductions de durées de sorties, mais ces dernières ne sont pas significatives.

Tableau 17. Effet de chaque type d'assistance sur les durées de sorties en lignes droites, comparativement à la condition contrôle

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.248	1.80	p=0.09
AvVol	-0.339	2.31	p<0.04*
AvSiège	-0.220	1.62	p=0.12
AM	-0.566	3.30	p<0.01*
AMSon	-0.427	2.80	p<0.02*

En **virages**, la valeur moyenne des durées de sorties en condition sans assistance est de 3.30s. Comme pour les lignes droites, les assistances AM et AMSon réduisent significativement les durées de sorties comparativement à la condition contrôle (Tableau 18). Contrairement à ce qui a été observé en lignes droites, l'assistance AvVol n'affecte pas significativement les durées de sorties en virages (Tableau 18). L'assistance AvVol rejoint ainsi les assistances AvSon et AvSiège en donnant lieu à des diminutions des durées de sortie non significatives.

Tableau 18. Effet de chaque type d'assistance sur les durées de sorties en virages, comparativement à la condition contrôlée

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.222	1.16	$p=0.26$
AvVol	-0.263	1.46	$p=0.16$
AvSiège	-0.188	1.32	$p=0.20$
AM	-0.683	3.38	$p<0.01^*$
AMSon	-0.653	3.43	$p<0.01^*$

— Comparatif entre assistances

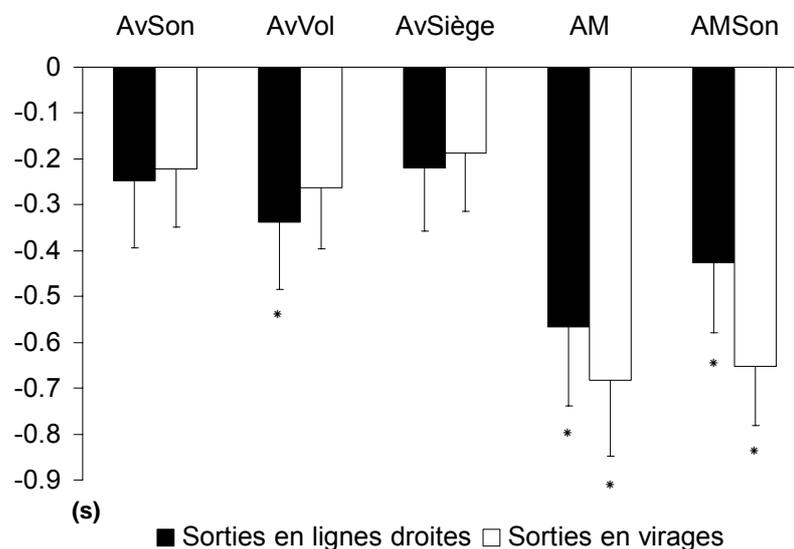


Figure 46. Effet des assistances sur les durées de sorties de voie, relativement à la condition contrôlée.

La valeur moyenne des durées de sorties en condition sans assistance est de 2.79 s pour les lignes droites et de 3.30 s pour les virages. Les barres d'erreurs représentent les erreurs types.

L'ANOVA à mesures répétées réalisée pour les sorties en lignes droites, révèle un effet significatif du type d'assistance ($F(4, 60) = 10.04$; $p < .001$; Figure 46). Cette même ANOVA montre l'absence de différences significatives entre les durées de sorties recueillies en lignes droites et celles recueillies en virages ($F(1, 15) = 0.05$; $p = .83$). Ces statistiques montrent également l'absence d'interactions significatives ($F(4, 60) = 1.29$; $p = .29$) entre le type d'assistance et l'endroit de sortie (virage ou ligne droite). Une analyse post-hoc (complétée d'une analyse fiducio-bayésienne) portant sur le type d'assistance a été réalisée, afin de qualifier les différences entre assistances. Ces analyses indiquent que les assistances AM et AMSon réduisent les durées de sorties de manière significativement plus importante que les autres assistances ($d = 336$ ms, $\delta > 272$ ms, $t(15) = 7.10$; $p < .001$). Les assistances AM et

AMSon ne se distinguent pas significativement entre elles et aucune autre différence significative n'est observée.

- **Pics d'accélération volant**

- Comparaison à la condition contrôle

En **lignes droites**, la valeur moyenne des pics d'accélération volant en condition sans assistance est de 1.58 °/s². Les pics d'accélération au volant ne sont pas modifiés significativement pour les assistances AvSon et AvVol (Tableau 19). En revanche, les modes AvSiège, AM et AMSon augmentent significativement les pics d'accélération volant en rapport à la condition contrôle.

Tableau 19. Effet de chaque type d'assistance sur les pics d'accélération volant en lignes droites, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (°/sec ²)	Valeur de <i>t</i> (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	0.212	1.77	p=0.09
AvVol	-0.047	0.31	p=0.75
AvSiège	0.547	2.20	p=0.04*
AM	0.913	4.87	p<0.001*
AMSon	0.896	4.78	p<0.001*

En **virages**, la valeur moyenne des pics d'accélération volant en condition sans assistance est de 1.60 °/s² pour les sorties. En virages, les assistances AM et AMSon donnent toujours lieu à des augmentations des pics d'accélération volant significatives. C'est aussi le cas pour l'assistance AvSon (Tableau 20).

Tableau 20. Effet de chaque type d'assistance sur les pics d'accélération volant en virages, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (°/sec ²)	Valeur de <i>t</i> (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	0.489	2.26	p<0.04*
AvVol	0.124	1.10	p=0.28
AvSiège	0.305	1.41	p=0.18
AM	0.953	6.40	p<0.001*
AMSon	1.151	9.60	p<0.001*

— Comparatif entre assistances

Comme pour les durées de sorties, une ANOVA à mesures répétées a été effectuée. L'effet principal du type d'assistance est significatif ($F(4, 60) = 20.46, p < .001$, Figure 47). En revanche, aucun effet significatif n'a été observé pour le tronçon de sortie ($F(1, 15) = 0.34, p = .57$) ou pour l'interaction entre le type d'assistance et l'endroit de sortie ($F(4, 60) = 1.79, p = .14$). Les analyses post-hoc montrent que les assistances AM et AMSon engendrent des pics d'accélération volant qui diffèrent significativement de ceux recueillis avec les autres assistances (augmentation moyenne (d) de $0.706^\circ/s^2, \delta > 570^\circ/s^2, t(15) = 6.96; p < .001$). Par ailleurs, les pics d'accélération enregistrés en présence des assistances AM et AMSon ne sont pas significativement différents entre eux. Aucune autre différence significative n'est apparue entre les assistances.

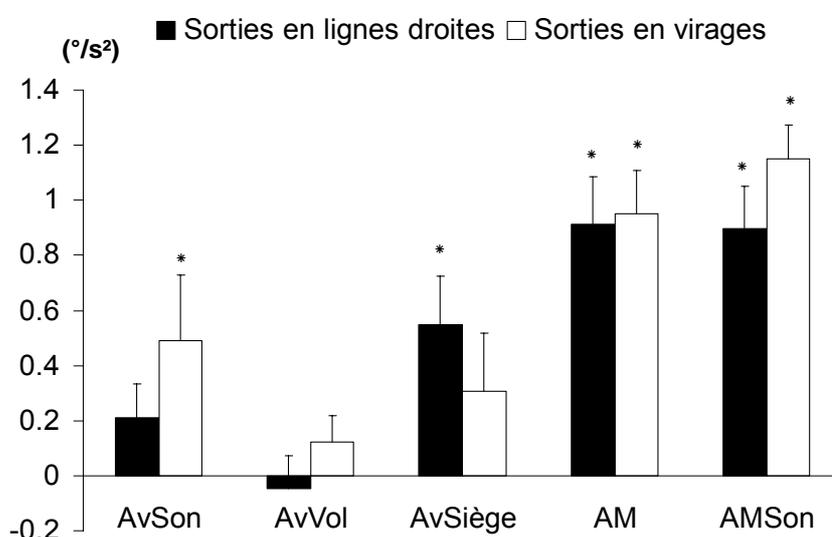


Figure 47. Effet des assistances sur les pics d'accélération volant relativement à la condition contrôle. La valeur moyenne des pics d'accélération volant en condition sans assistance est de $1.58^\circ/s^2$ pour les sorties en lignes droites et de $1.60^\circ/s^2$ pour les sorties en virages.

Les barres d'erreurs représentent les erreurs types.

• **Temps de réponse**

— Comparaison à la condition contrôle

En **lignes droites**, la valeur moyenne des temps de réponse en condition sans assistance est de 0.439 s. Aucune assistance ne modifie significativement les temps de réponse au volant comparativement à la condition contrôle (Tableau 21).

Tableau 21. Effet de chaque type d'assistance sur les temps de réponse en lignes droites, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.022	0.73	p=0.46
AvVol	-0.072	1.89	p=0.07
AvSiège	0.002	0.08	p=0.93
AM	-0.06	1.21	p=0.24
AMSon	-0.068	1.65	p=0.12

En **virages**, la valeur moyenne des temps de réponse en condition sans assistance est de 0.419 s. Cette fois, les résultats indiquent une réduction significative des temps de réponse avec le mode d'assistance AvVol (Tableau 22). Les autres assistances n'ont pas d'effet significatif.

Tableau 22. Effet de chaque type d'assistance sur les temps de réponse en virages, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (sec)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	-0.02	0.49	p=0.63
AvVol	-0.11	2.70	p<0.02*
AvSiège	-0.034	0.89	p=0.39
AM	-0.044	1.03	p=0.31
AMSon	-0.072	1.97	p=0.06

— Comparatif entre assistances

L'ANOVA portant sur l'effet des assistances en fonction de l'endroit de sortie, montrent un effet du type d'assistance sur les temps de réponse ($F(4, 60) = 3.34, p < .02$), une absence d'effet de l'endroit de sortie ($F(1, 15) = 0.68, p = .80$) et une interaction significative entre le type d'assistance et l'endroit de sortie ($F(4, 60) = 0.66, p = .62$; Figure 48). Au regard des analyses post-hoc, aucune assistance ne se différencie significativement d'aucune autre. Toutefois, en moyenne, les assistances agissant directement sur le volant (AvVol, AM et AMSon) réduisent plus les temps de réponse que les autres assistances ($d = 52$ ms, $\delta > 26$ ms, $t(15) = 2.64; p < .02$).

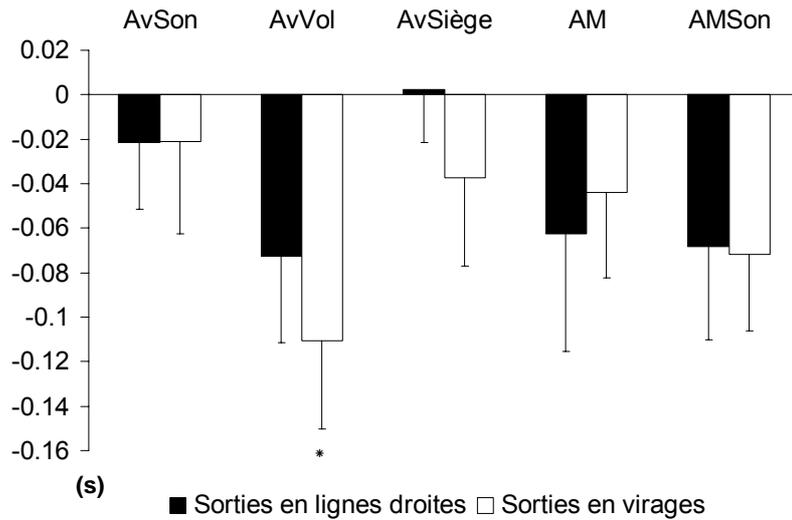


Figure 48. Effet des assistances sur les temps de réponse. La valeur moyenne des temps de réponse en condition sans assistance est de 0.439 s en lignes droites et de 0.419 s en virages.

Les barres d'erreurs représentent les erreurs types.

- **Surcompensation**

- Comparaison à la condition contrôle

En **lignes droites**, la taille moyenne des surcompensations en condition sans assistance est de 0.247 m. La taille des surcompensations est augmentée significativement en présence des assistances AM et AMSon. Pour les autres assistances, l'augmentation des surcompensations enregistrées n'est pas significative (Tableau 23).

Tableau 23. Effet de chaque type d'assistance sur les surcompensations en lignes droites, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (m)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	0.058	1.81	p=0.09
AvVol	0.125	1.80	p=0.09
AvSiège	0.043	1.11	p=0.28
AM	0.129	3.00	p<0.01*
AMSon	0.166	3.32	p<0.01*

En **virages**, la taille moyenne des surcompensations en condition sans assistance est de 0.305 m. Les statistiques mettent en évidence une augmentation significative des tailles de surcompensations en comparaison à la condition contrôle pour toutes les assistances exceptée pour le mode AvSiège (Tableau 24).

Tableau 24. Effet de chaque type d'assistance sur les surcompensations en virages, comparativement à la condition contrôle.

Type d'assistance	Effet observé (m)	Valeur de t (19)	Probabilité (t-test)
AvSon	0.157	3.31	$p < 0.01^*$
AvVol	0.114	2.72	$p < 0.02^*$
AvSiège	0.093	1.88	$p = 0.08$
AM	0.126	2.97	$p < 0.001^*$
AMSon	0.079	2.64	$p < 0.02^*$

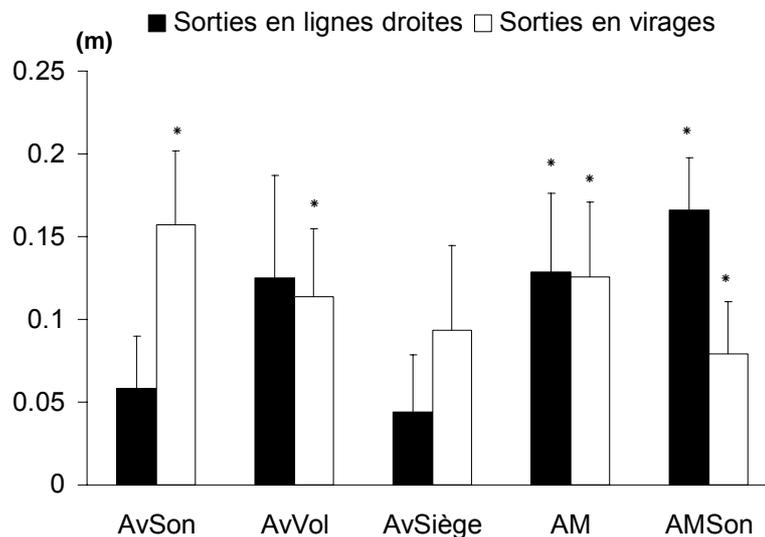
— Comparatif entre assistances

Figure 49. Effet des assistances sur la taille des surcompensations après sortie. La taille moyenne des surcompensations en condition sans assistance est de 0.247 m en lignes droites et de 0.305 m en virages. Les barres d'erreurs représentent les erreurs types.

L'ANOVA portant sur l'effet des assistances, toutes conditions expérimentales confondues, ne met pas en évidence d'effet significatif du type d'assistance sur la taille des surcompensations ($F(4, 60) = 0.59, p = .67$; Figure 49). Par ailleurs, ni l'endroit de sortie, ni l'interaction entre le type d'assistances et l'endroit de sortie ne sont significativement affectés (respectivement : $F(1, 15) = 0.07, p = .79$ et $F(4, 60) = 1.85, p = .13$). Pour conclure, la moyenne de la taille des surcompensations est d'environ 38 cm en présence d'une assistance quelle qu'elle soit, contre 28 cm sans assistance. La taille des surcompensations est alors augmentée d'environ 10 cm en présence des assistances.

III.3.2 Données subjectives

- **Classement par rangs**

La figure 50 présente la distribution de l'ensemble des dispositifs d'assistance par ordre de préférence, du dispositif le mieux accepté (AvSon : rang moyen 2.39) au dispositif le moins bien accepté (AM : rang moyen 3.83). Les dispositifs d'assistance AvVol, AMSon et AvSiège ont donné des résultats intermédiaires avec des rangs moyens de respectivement 2.83 ; 2.94 et 3. Une ANOVA de Friedman n'a révélé aucune différence significative entre les différents dispositifs d'assistance pour ce classement par ordre de préférence.

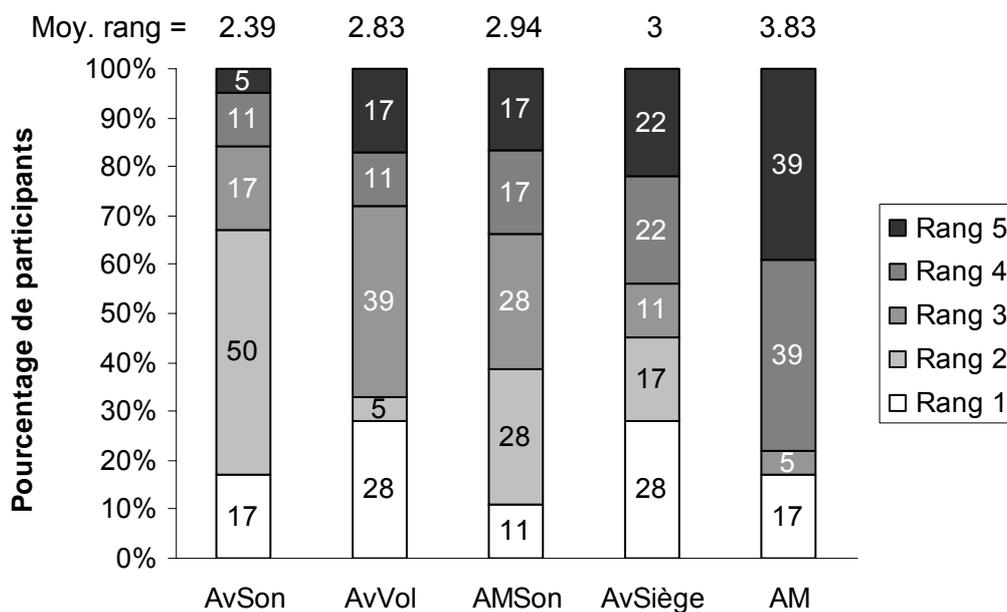


Figure 50. Proportion par rang du classement relatif des dispositifs d'assistance par ordre de préférence.

La figure 51 présente un comparatif entre l'efficacité et l'acceptabilité des assistances basé sur le classement par rang opéré par les conducteurs. Les cinq dispositifs d'assistance ont été classés du plus apprécié au moins apprécié. Les durées moyennes des sorties de voie ont été utilisées pour représenter l'efficacité globale des dispositifs d'assistance. Ce graphique met en évidence la dissociation entre l'efficacité du dispositif et le classement par ordre de préférence opéré par les conducteurs. Ainsi, l'AvSon qui fait partie des trois dispositifs les moins efficaces (avec l'AvVol et AvSiège), est également le dispositif préféré des conducteurs. Toutefois, la faible efficacité du dispositif n'est pas non plus un critère d'acceptabilité. L'AvSiège, bien qu'étant parmi les dispositifs les moins efficaces, est classé en avant-dernière position. A l'inverse de l'AvSon, l'AM seul est l'un des deux dispositifs les plus efficaces (avec l'AMSon) mais est le dispositif classé en dernière position par les

conducteurs. Finalement le dispositif AMSon semble être optimum, ce dernier est à la fois particulièrement efficace et classé dans une position intermédiaire par ordre de préférence.

L'ensemble de ces observations est uniquement descriptive et n'a valeur que de tendance. Afin de conclure à des différences significatives entre les différents dispositifs d'assistance, il conviendrait de réaliser ces analyses subjectives sur un échantillon de population beaucoup plus important.

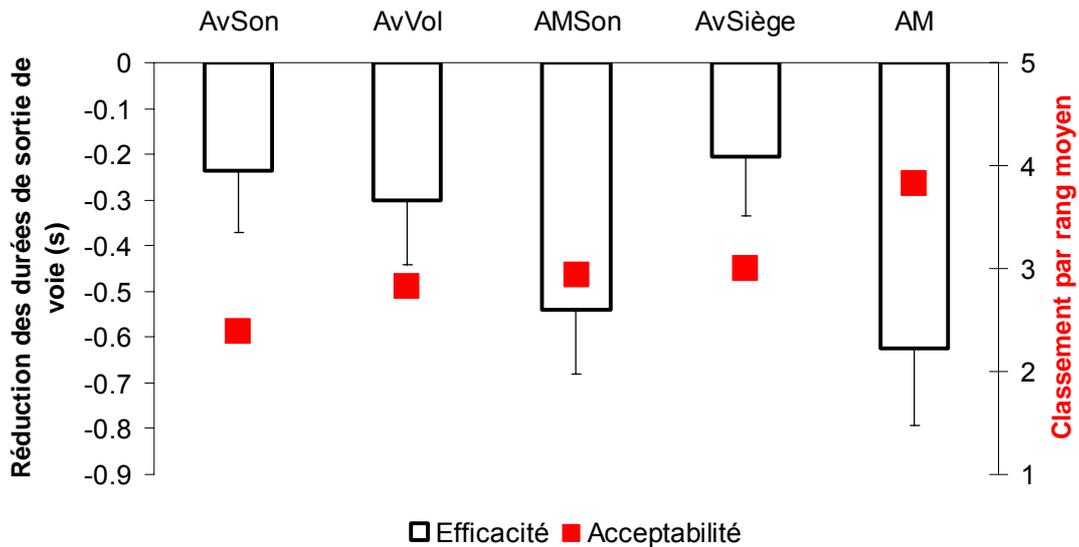


Figure 51. Comparatif entre acceptabilité et efficacité. L'acceptabilité repose sur le classement par rang et l'efficacité sur la réduction des durées de sorties de voie par rapport à la condition contrôlée (0 sur le graphique). Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

- **Analyse des entretiens**

L'analyse des verbalisations a été réalisée par Myriam El-Jaafari et Jean-François Forzy du groupe ergonomie cognitive de chez Renault.

Les analyses des protocoles verbaux réalisées au cours de cette étude sont très qualitatives et n'ont pas vocation à déterminer l'acceptabilité des différents dispositifs d'assistance de manière affirmée. Ces entretiens ont plutôt été entrepris afin d'explorer les sensations éprouvées par les conducteurs en présence des différents dispositifs d'assistance. Il s'agit donc de la première étape d'une démarche visant à appréhender l'acceptabilité des assistances de type avertissement aux sorties de voie.

Les analyses ont permis d'identifier quatre dimensions dans le discours des conducteurs. Premièrement, une dimension relative au « ressenti », qui comprenait la perception sensorielle de la stimulation générée par le dispositif et le traitement de l'information perçue. Deuxièmement, une dimension dite « interprétation du signal » où les verbalisations relevant de la signification du signal ont été regroupées. Une troisième dimension comprenant les

éléments discursifs relatifs à l'utilité des dispositifs d'assistance, a été associée à une dimension dite « utilité perçue ». Finalement, une quatrième et dernière dimension « attitudes » regroupe les verbalisations témoignant du sentiment favorable ou non du conducteur vis-à-vis du dispositif. L'ensemble des verbalisations enregistrées a été catégorisé selon ces quatre dimensions, en termes d'expression positives et négatives. Cependant, compte tenu de l'effectif limité de participants, cette catégorisation n'a pas permis de mettre en avant de différences entre les différents dispositifs évalués. C'est pourquoi seuls les principaux éléments qualitatifs des verbalisations recueillies seront présentés. Ces éléments sont autant de sources d'explication du classement par ordre de préférence effectué par les conducteurs.

Avec l'AvSon, 15 participants (soit plus de 83 % des participants) rapportent avoir une bonne perception de la latéralisation du signal. Le signal auditif apparaît comme non agressif et bien intégré à l'activité de conduite (6 participants, soit environ 33 % des participants). Par exemple, un participant a déclaré à propos de l'AvSon « *celle-là, elle est vraiment soft* ». Le son imitant celui émis lors d'un passage sur des bandes rugueuses semble être à l'origine de la bonne intégration de l'AvSon à l'activité de conduite. Huit conducteurs (environ 44 %) ont témoigné de la familiarité de ce son (ex. : « *on a l'habitude du bruit* ») et de son analogie au bandes rugueuses (ex. : un participant en évoquant l'AvSon « *moi, c'est le rappel des bandes rugueuses* »). La familiarité du signal d'avertissement a amené certains conducteurs (quatre) à mieux répondre à l'avertissement (ex. : « *on sait tout de suite ce qu'il faut faire* »). Sept participants (soit environ 39 %) notent toutefois le risque de confusion du signal délivré par l'AvSon avec d'autres bruits perceptibles en cours de conduite (ex. : autoradio, moteur, passagers, intempéries...).

Avec l'AvVol, huit conducteurs (environ 44 %) ont déclaré mal percevoir la latéralisation du signal. La vibration était perçue comme étant appliquée sur les deux mains ou n'indiquant pas clairement le côté de sortie de voie (ex. : « *dans le volant, on sent bien que ça vibre plus sur l'un que sur l'autre, mais ça vibre dans les deux finalement* »). Néanmoins, cinq participants (soit environ 28 % de l'effectif) déclarent que le dispositif est utile (ex. : « *la vibration porte mon attention sur la voie* »). L'utilité du dispositif se traduit par une indication claire du comportement à adopter chez trois participants (ex. : « *tu sais clairement où tu es sorti et par où il faut aller* »).

Avec l'AvSiège, douze participants (près de 67 % de l'effectif) déclarent percevoir clairement la latéralisation du signal délivré par l'assistance (ex. : « *on sent très bien le côté où ça le fait, ça reste discret dans le véhicule* »). Trois participants (environ 17 %) jugent également le dispositif comme peu intrusif dans le contrôle latéral du véhicule (ex. : « *je le sens bien, mais j'ai l'impression que c'est toujours moi qui pilote* »).

Avec l'AM, huit participants (environ 44 %) déclarent mal percevoir la latéralisation du signal (ex. : « *les à-coups ne sont pas du tout indicatifs, c'est un mouvement de va et vient* »). Le signal transmis par le dispositif provoque une gêne dans le contrôle de la trajectoire du véhicule (huit participants, ex. : « *on a l'impression de ne pas contrôler la voiture* »). Cinq participants (équivalent à environ 28 % de l'effectif) interprètent mal le dispositif d'assistance (ex. : « *elle a tendance à me contredire* »). Cependant, l'utilité théorique du dispositif est reconnue par six participants (environ 33 % des participants ; ex. : « *c'est bien ça prépare ta réaction* » ; « *la voiture me montre ce qu'il faut que je fasse* »). Finalement, trois participants présentent des attitudes favorables en rapport au dispositif AM (ex. : « *le seul qui rattrape l'erreur, c'est le volant qui tourne* » ; « *y'a moins de stress* »).

Avec l'AMSon, seuls deux participants (11 % de l'effectif) déclarent percevoir simultanément le signal sonore et le signal haptique, tandis que huit conducteurs déclarent percevoir un des deux signaux avant l'autre ou un seul des deux signaux (ex. : « *moi, le son, on va dire que je ne l'entends pas parce que ça fait plein de choses* » ; à propos de l'AM « *elle n'aurait pas été là, ça n'aurait quasiment rien changé, je ne l'ai pas ressenti du tout* » ; « *je pense que mon cerveau détecte plus vite le signal que quand il écoute le son* » à propos de l'AM).

III.4 DISCUSSION

L'efficacité globale des assistances lors des situations critiques est évaluée en fonction de la réduction des durées de sortie de voie qu'elles engendrent. De ce point de vue, les dispositifs d'assistance de type amorçage moteur (AM seul ou en combinaison avec AvSon) améliorent les performances des conducteurs. En revanche, les assistances appartenant à la catégorie système d'avertissement aux sorties de voie (AvSon, AvVol, AvSiège) n'ont montré que très peu d'apports significatifs en comparaison à la condition contrôle. Ce bénéfice de l'amorçage moteur ne peut s'expliquer par la réduction modérée des temps de réponse (61 ms en moyenne), qui ne se distingue pas significativement de celles recueillies avec les autres assistances. En revanche, les dispositifs amorçage moteur engendrent des pics d'accélération volant plus importants que l'ensemble des autres assistances (augmentation moyenne de 60 %). Les corrections au volant entreprises sont donc plus vives avec les dispositifs AM. Ces résultats confirment ceux obtenus dans la première expérience, en pointant la vivacité de la manœuvre de correction comme la composante principale de l'efficacité de l'amorçage moteur.

L'avertissement vibratoire au volant a été introduit avec pour objectif d'isoler le rôle du caractère incitatif de l'amorçage moteur dans les effets observés. En effet, cette assistance est en tout point comparable à l'amorçage moteur (signal haptique latéralisé au volant), excepté qu'elle ne fournit pas l'indice moteur qui donne à ce dernier son caractère incitatif. Or, le mode AvVol a des effets sur les durées de sortie de voie et les pics d'accélération au volant tout à fait similaires aux autres dispositifs d'avertissement (AvSon et AvSiège). Le caractère

incitatif (fruit de l'amorce motrice) semble donc être à l'origine des bénéfices enregistrés avec les dispositifs amorçage moteur, appuyant l'hypothèse selon laquelle l'AM serait en mesure d'agir directement au niveau de la mise en œuvre des actions de correction de trajectoire. Ce dispositif d'assistance agirait comme un signal haptique latéralisé facilitant le mouvement qui doit être opéré par les conducteurs. Divers autres éléments constitutifs du mode amorçage moteur pourraient cependant expliquer, même partiellement, sa supériorité comparativement aux autres assistances testées. Ces éléments sont relatifs au site de stimulation utilisé par l'assistance (les assistances AM utilisent le volant) et à la modalité sensorielle utilisée par l'assistance (les assistances AM utilisent la modalité haptique).

Concernant l'effet du site de stimulation, il est possible qu'une assistance agissant directement sur l'organe effecteur, à la fois du véhicule (le volant) et des conducteurs (les mains), favorise une réponse plus rapide. Les résultats obtenus ici montrent en effet une légère tendance à la réduction des temps de réponse au volant avec l'usage d'assistances utilisant directement le volant pour véhiculer les informations (AvVol, AM et AMSon). Cette réduction des temps de réponse ne se répercute pas sur les autres indicateurs de la qualité des manœuvres de rétablissement, que ce soit en termes de vivacité de la correction au volant (pics d'accélération volant) ou de durées de sortie de voie. Il apparaît donc que, stimuler l'effecteur de la réponse plutôt que des capteurs sensoriels déportés (cuisses pour l'assistance siège vibrant et système auditif pour l'avertissement sonore), n'est pas déterminant dans l'amélioration des performances globales des conducteurs.

L'assistance de type siège vibrant a été introduite afin de déterminer le bénéfice propre à utiliser la modalité haptique plutôt que par la modalité auditive pour fournir l'information relative à la sortie de voie. En effet, pour répondre à cette question, il convenait de comparer une alarme sonore latéralisée à une alerte latéralisée, utilisant le canal haptique, mais n'agissant pas directement sur l'organe effecteur. Tout comme dans la première expérimentation, les durées de sortie de voie obtenues avec un avertissement sonore et un avertissement vibratoire sont comparables. Les assistances AvSon et AvSiège engendrent d'ailleurs des résultats très comparables pour l'ensemble des variables. Toutes deux n'améliorent significativement, ni les temps de réponse au volant (réduction moyenne de 21 ms pour AvSon et de 32 ms pour AvSiège), ni les pics d'accélération au volant (augmentation moyenne de $0.323^\circ/s^2$ et $0.399^\circ/s^2$, soit environ 20 % et 25 % d'augmentation en comparaison à la condition contrôle, pour respectivement les assistances AvSon et AvSiège), ni les durées de sorties de voie (réduction moyenne de 235 ms et 204 ms pour les assistances AvSon et AvSiège respectivement). En conséquence, et comme pour l'effet du site de stimulation, la modalité haptique en elle-même (indépendamment des possibilités d'amorce qu'elle autorise) ne semble pas permettre d'amélioration des performances. Toutefois, il serait illusoire de penser que la simple comparaison de ces deux assistances nous permette d'apporter une réponse ferme et exhaustive sur la modalité sensorielle à

utiliser pour avertir les conducteurs confrontés à une situation critique. En effet, une très large variété dans les dispositifs d'assistance, aussi bien sonores que vibratoires, est envisageable. L'avertissement sonore généré par l'assistance dans cette étude, correspond à un son évocateur connu des automobilistes (imitation d'un passage sur des bandes rugueuses). Il est tout à fait envisageable d'utiliser un avertissement sonore non évocateur dont les différents paramètres pourraient être variés. Il en est de même pour l'utilisation de la modalité haptique où d'autres sites et paramètres de vibration (fréquence, intensité, etc.), pourraient amener d'autres résultats que ceux rapportés dans cette étude.

Les assistances de type AM sont les seules, parmi celles testées, à améliorer significativement les manœuvres de rétablissement. Ceci constitue une différence notable avec les résultats obtenus lors de l'expérimentation précédente et d'autres résultats observés par divers auteurs (Rimini-Doering et al., 2005 ; Sayer et al., 2005 ; Suzuki & Jansson, 2003). En effet, dans l'expérimentation antérieure, nous avons enregistré un bénéfice pour l'ensemble des assistances évaluées, y compris les dispositifs d'avertissement, même si ce bénéfice était moindre par rapport à celui apporté par l'amorçage moteur. Cependant, bien que non significatif, la taille des effets moyens observés ici avec l'introduction des alertes n'est pas négligeable pour autant. Les tailles des effets sur les durées de sorties de voie sont assez proches de ceux observés dans l'étude précédente. En ligne droite, une réduction moyenne de 258 ms (environ 19% rapporté à la condition contrôle) des durées de sortie de voie avait été rapportée, contre 269 ms (environ 10% rapporté à la condition contrôle) pour la présente étude. De même, en virage, l'effet était de 391 ms (environ 20% rapporté à la condition contrôle) contre 224 ms ici (environ 7% rapporté à la condition contrôle). Même si la taille des effets est globalement plus petite dans l'expérience 2, il apparaît que c'est surtout la proportion de réduction en rapport à la condition contrôle qui est beaucoup plus faible (plus de moitié moindre) pour cette expérience que pour l'expérience précédente. La différence entre les deux études s'étend également aux assistances contenant un amorçage moteur. Globalement, pour les assistances AM et AMSon, les durées de sortie de voie étaient réduites de 641 ms (environ 38% rapporté à la condition contrôle) dans l'expérimentation précédente, contre 582 ms ici (environ 19% rapporté à la condition contrôle). Là encore, c'est moins la taille absolue des effets qui semble diminuée que leur importance relative à la condition contrôle.

La moindre efficacité des assistances dans leur ensemble pourrait résider dans certaines variations méthodologiques par rapport à l'étude précédente : usage d'un simulateur de conduite différent, lui-même équipé d'assistances similaires dans leur mode de fonctionnement mais réglées différemment. Plus probablement, la variabilité importante dans la nature des sorties de voies générées par la tâche de lecture est une source d'explication des différences entre les deux études. Au lieu d'occulter la scène visuelle, comme précédemment, les conducteurs ont été distraits afin de se rapprocher des conditions

habituellement génératrices de sorties de voie. Cette méthode est plus écologique, mais présente également l'inconvénient d'être moins contrôlable que la situation d'occlusion visuelle. En effet, les conducteurs sont investis dans une tâche de lecture sur laquelle il leur est demandé de focaliser leur attention. Cette tâche combine trois formes de distractions (visuelle, physique et cognitive) qui sont autant de sources de variabilité. Par exemple, la position adoptée par les conducteurs pour réaliser leur tâche de lecture était libre. Les conducteurs pouvaient adopter une posture pour rapprocher leur tête de l'écran afin d'en faciliter la lecture ou, au contraire, rester dans une position proche de la position de conduite normale et faire un effort de concentration visuelle sur l'écran. De plus, le passage de la tâche de lecture à la tâche de conduite était probablement très variable selon les sujets. Rappelons qu'au moment où le véhicule atteignait une position donnée, la tâche de lecture prenait fin et les conducteurs pouvaient de nouveau se consacrer pleinement à leur tâche de conduite. Même si la disparition des mots à lire et le déclenchement concomitant des assistances signalaient la nécessité de revenir à une vision frontale, les conducteurs pouvaient être plus ou moins réactifs, en fonction de leur investissement dans la tâche de lecture. Autrement dit, le réinvestissement des capacités attentionnelles dans la tâche de conduite pouvait varier d'un sujet à l'autre et d'une tâche de lecture à l'autre. La technique de l'occlusion visuelle n'est pas associée à ce type de problématique attentionnelle, puisque le sujet, dans ce cas, n'est pas distrait et sait qu'il va devoir corriger la trajectoire du véhicule dès la réapparition de la scène visuelle. En conséquence, les sorties de voies étaient plus stéréotypées dans la première expérience et les comparaisons entre situations expérimentales plus susceptibles de faire apparaître des effets significatifs.

Cette étude renforce l'idée selon laquelle l'amorçage moteur est un concept très prometteur pour améliorer le comportement des conducteurs en situation de sortie de voie. Cependant, le réglage des paramètres de l'assistance (amplitude et fréquence du signal au volant) semble assez délicat à déterminer et des progrès sont sûrement à faire dans cette direction. L'adoption d'un signal de forme triangulaire plutôt que d'un signal de forme rectangulaire tel qu'il avait été utilisé par Suzuki et Jansson (2003) semble, d'ores et déjà, permettre d'éviter que certains conducteurs contrent le système (c'est-à-dire qu'ils tournent le volant dans le sens opposé à celui proposé par le dispositif). Néanmoins, une analyse plus fine des paramètres du dispositif est un préalable incontournable avant d'envisager une exploitation commerciale de cette assistance. Par ailleurs, l'ensemble des assistances évaluées lors de cette étude occasionne des surcompensations plus importantes qu'en condition sans assistance. De ce point de vue, aucun type d'assistance ne se distingue significativement des autres. Les assistances augmentent les surcompensations enregistrées en condition contrôle d'environ 10 cm en moyenne. Cet effet transversal aux assistances évaluées est donc assez limité, de par son amplitude, et ne revêt aucun caractère dangereux, mais qu'il convient cependant de surveiller.

Le deuxième objectif de cette expérience était de fournir une première évaluation des différents dispositifs d'assistance en termes d'acceptabilité. Une évaluation complète de l'acceptabilité des dispositifs aurait nécessité la participation de nombreux conducteurs sur de longues périodes de temps. Les analyses menées dans ce sens au cours de notre étude constituent simplement une première étape dans l'évaluation de l'acceptabilité des dispositifs d'assistance de type avertissement aux sorties de voie. En raison du faible nombre de participants, les différences entre assistances mises à jour lors des analyses subjectives ne se sont d'ailleurs pas révélées significatives. Malgré tout, des tendances descriptives, qui pourraient servir de base de travail à des études futures, sont apparues. Ainsi, le dispositif AvSon semble être le dispositif préféré des conducteurs tandis que le dispositif AM est celui qui l'est le moins. Les autres dispositifs d'assistance (AvVib, AvSiège et AMSon) ont été positionnés entre l'AvSon et l'AM.

Les résultats obtenus semblent indiquer que l'efficacité du dispositif d'assistance ne soit pas un élément déterminant de son acceptabilité. En effet, l'AM est considéré comme le dispositif le moins acceptable alors que c'est le plus efficace, tandis que l'AvSon tend à être préféré par les conducteurs alors que l'amélioration des performances qu'il génère est parmi les plus limitées. Nos résultats vont donc dans le sens de ceux recueillis par Ho et al. (2006) qui montrent l'absence de corrélation entre efficacité et acceptabilité de dispositifs d'assistance à la conduite.

Par ordre de préférence, l'AM a été classé en dernière position par les conducteurs et semble moins bien accepté que les autres dispositifs. Ces éléments appuient ceux rapportés par Kozak et al. (2006) qui indiquent qu'une assistance de type SAS faisant usage d'un couple de force au volant est perçue comme moins acceptable et aidant moins qu'une simple vibration du volant ou un avertissement auditif. Comme pour notre étude, la moindre acceptabilité du dispositif AM n'est pas liée à son action sur le volant. L'AvVib n'est pas perçu comme moins acceptable que l'AvSiège alors que le premier utilise le volant pour véhiculer l'information. Les entretiens semblent imputer la moindre acceptabilité de l'AM à deux causes principales : une gêne perçue dans le contrôle de la trajectoire du véhicule et une mauvaise compréhension du signal délivré (à la fois en termes de latéralisation et d'interprétation). Ces deux éléments peuvent être reliés au sentiment de perte de contrôle parfois décrit dans la littérature (ex. : Comte et al., 2000 ; Young & Regan, 2007).

L'AvSon a été préféré par les conducteurs car il a été perçu comme facilement compréhensible, bien intégré à l'activité et familier. Sayer et al. (2005) ont déjà observé une bonne compréhension d'un avertissement sonore imitant le bruit de passage sur des bandes rugueuses. L'identification du côté de sortie de voie, en particulier, semble être facilitée avec ce dispositif.

La différence d'acceptabilité (non avérée statistiquement) entre les dispositifs AvSon et AM était attendue. L'usage d'un dispositif combinant les deux signaux précédents apparaît donc d'autant plus pertinent. Dans une étude antérieure, Tijernia et al. (1995) rapportent que les conducteurs seraient prêts à payer le double pour un système d'avertissement aux sorties de voie impliquant à la fois la modalité sonore et la modalité haptique, à la place d'une seule de ces modalités sensorielles. Les résultats obtenus dans notre étude mettent en avant le maintien des meilleures performances avec le dispositif AMSon (performances similaires à celles obtenues avec l'AM seul), tout en améliorant l'acceptabilité du dispositif (classement comparable aux dispositifs AvVol et AvSiège). L'AMSon apparaît donc comme un dispositif capable de concilier des performances optimales avec une acceptabilité intermédiaire. D'après les verbalisations enregistrées, une meilleure synchronisation des signaux délivrés (sonore et haptique) pourrait encore améliorer l'acceptabilité de ce dispositif.

IV. CONCLUSIONS SUR LA PARTIE EXPERIMENTALE 1

Les deux études de la partie expérimentale 1 ont montré l'apport de systèmes d'avertissement aux sorties de voie lors de la survenue de situations critiques, même si la variabilité de ces situations a rendu moins significatif l'effet global de ces dispositifs dans la deuxième étude. Le dispositif amorçage moteur s'est révélé plus efficace que les autres dispositifs d'assistance utilisés. Cette meilleure efficacité est attribuable à une intervention directe au niveau de la réalisation de l'action, tandis que les autres dispositifs d'avertissement agissent au niveau du diagnostic de la situation. L'étude 2 confirme que c'est bien le caractère incitatif de l'amorçage moteur qui génère de meilleures performances avec ce dispositif d'assistance qu'avec les autres dispositifs. Aucun dispositif ne s'est avéré modifier négativement le comportement des conducteurs, aussi bien en conduite nominale que lors de la mise en situation d'invalidité de l'assistance (contournement d'obstacle). La combinaison de l'amorçage moteur avec un avertissement auditif (de type bruit de passage sur des bandes rugueuses) offre une efficacité comparable à celle offerte par l'amorçage moteur seul, et semble être en mesure d'améliorer l'acceptabilité du dispositif.

La question de la latéralisation des assistances n'a pas été abordée directement. En situation critique, l'expérience 1 tend à montrer que les conducteurs prennent le temps d'analyser la scène visuelle avant d'apporter la correction volant nécessaire au remplacement du véhicule dans une position sur la voie correcte. Des résultats du même ordre avaient été rapportés par Suzuki et Jansson (2003) lors d'une comparaison entre un avertissement sonore latéralisé et un avertissement sonore non latéralisé. Toutefois, il existe une littérature sur les compatibilités stimulus-réponse qui tend à montrer qu'il est avantageux de donner une information du côté de la correction à effectuer. Par exemple, Wang, Proctor et Pick (2003) ont demandé aux participants de tourner un volant du côté d'un son, ou du côté opposé à ce même son. Les participants répondent plus rapidement et font moins d'erreurs si le son

provient du même côté que la réponse motrice à réaliser. Il est intéressant de noter que la position des mains sur le volant peut modifier la notion de droite/gauche perçue par les conducteurs et donc les résultats qui viennent d'être énoncés.

Dans le contexte de la conduite automobile, la question du bénéfice lié à l'usage d'une information latéralisée se pose donc. Si une information latéralisée est pertinente que doit-elle indiquer ? Le sens de la correction à réaliser comme des études décontextualisées (simple volant sans scène visuelle ; ex. : Wang et al., 2003) semblent le montrer, ou bien le côté de sortie de voie ? En effet, une approche plus ergonomique (Wickens & Holland, 2000) considèrerait que les conducteurs ont associé un événement (par exemple un son imitant celui d'une bande rugueuse) à une sortie de voie du côté de l'événement. Par conséquent, les assistances tireraient avantage d'une latéralisation du côté de la sortie de voie. Les deux études qui constituent la première partie de cette thèse ne répondent pas clairement à l'importance de la latéralisation du dispositif d'assistance. Particulièrement, l'amorçage moteur informe le conducteur sur le côté de la correction à réaliser tandis que les autres dispositifs d'assistance informent le conducteur sur le côté de sortie de voie. Une étude s'intéressant spécifiquement à l'importance de la latéralisation des assistances serait nécessaire afin d'éclaircir ce point.

Au-delà de cette limite, la fréquence d'apparition des situations critiques dans nos études est beaucoup plus élevée que leur fréquence d'apparition en conduite naturelle. Les situations de sorties de voie imminentes, de par leur répétition, sont probablement moins surprenantes qu'en conditions réelles. Toutefois, des situations critiques plus surprenantes auraient certainement conduit à de plus forts effets des assistances évaluées, en mettant plus à profit leur composante alerte.

Avant d'envisager une utilisation commerciale, les dispositifs d'assistance évalués dans nos études, devraient être étudiés sur un plus grand nombre de personnes et sur des durées d'utilisation plus longues. Par ailleurs, un seuil de déclenchement tenant compte de la vitesse de dérive latérale du véhicule vers le bord de voie (comme le « time to lane crossing » par exemple, voir Van Winsum & Godthelp (1996)) pourrait améliorer l'efficacité de l'ensemble des dispositifs en ajustant plus finement le moment de déclenchement de l'assistance aux besoins des conducteurs.

Finalement, compte tenu de l'action de l'AM sur la colonne de direction du véhicule, le signal qu'il délivre pourrait être bruité par diverses vibrations du volant émanant du contact entre la chaussée et les roues du véhicule. Ces vibrations parasites, pourraient se montrer particulièrement présentes lors de sorties de route où les conducteurs roulent sur le bas-côté de la chaussée. Néanmoins, avec le développement actuel du « steer-by-wire », cette limite semble destinée à disparaître rapidement. Cette nouvelle technologie consiste à décorrélérer physiquement les mouvements de volant de ceux des roues du véhicule. Elle offre ainsi la

possibilité de modifier les retours d'effort au volant sans strictement aucune incidence sur la trajectoire du véhicule. Cet avantage vient s'ajouter à celui de ne pas nécessairement retransmettre sur le volant l'ensemble des vibrations liées aux déformations de la chaussée. Il n'est toutefois pas question de supprimer toutes les vibrations dans le volant émanant du contact entre les pneumatiques et la chaussée, car certaines sont porteuses d'informations utiles aux conducteurs (ex. : vitesse inadaptée à la qualité de la chaussée).

PARTIE EXPÉRIMENTALE 2 : RÉGULATION LATÉRALE AUTOMATISÉE ET ADAPTATIONS COMPORTEMENTALES ASSOCIÉES

Manuscrit soumis à publication :

Navarro J., Hoc J.M. & Mars F. Delegation of lateral control in car driving: risk related to complacency. *Safety Science*.

I. INTRODUCTION

Le régulateur de position latérale (RPL) est une assistance douce (Young & Stanton, 2006) car les conducteurs conservent la pleine autorité sur le contrôle du véhicule, même si une partie de l'activité de guidage est confiée au dispositif (délégation de fonction). Ainsi, le dispositif d'assistance peut être désengagé à tout moment. Suite à l'introduction de tels dispositifs remplaçant les individus dans une partie de leur activité, divers effets néfastes ont déjà été observés, notamment dans le domaine de l'aviation. Certains de ces phénomènes indésirables seraient transférables au domaine de la conduite automobile (Stanton & Young, 1998 et 2000).

Il est fréquemment fait état d'un phénomène associé à la délégation de fonction nommé phénomène de contentement (Moray, 2003 ; Parasuraman et al., 1993). Dans le domaine des assistances à la conduite automobile, Ward et al. (1995) et Stanton et al. (2001) sont les premiers à observer l'apparition d'un phénomène de contentement en présence de régulateur de vitesse et d'inter-distance (ACC). Différents auteurs ont proposé différentes définitions du phénomène contentement qui ont été résumées par Parasuraman et al. (1993). Pour l'opérateur humain, les mots-clés résumant le concept de contentement sont : faible défiance envers le dispositif, satisfaction, hypovigilance, défaut d'attention, etc. En d'autres termes, l'opérateur humain laisse l'assistance réaliser des opérations, sans y consacrer suffisamment d'attention ou alors une attention non appropriée (Moray, 2003). La question de pourquoi l'opérateur doit continuer d'être attentif à une tâche qu'il a déléguée à l'assistance peut alors se poser. La raison du maintien des conducteurs dans la boucle est liée à la complexité et l'incertitude caractérisant les situations dynamiques. Si les événements amènent à une situation dépassant les limites de validité du dispositif d'assistance, l'opérateur doit être capable de gérer cette situation. Il peut alors être amené à corriger les actions entreprises par l'assistance ou à reprendre le contrôle manuel de la situation.

Les mécanismes du phénomène de contentement peuvent couvrir trois types d'activités humaines (Hoc et al., sous presse). Premièrement, les conducteurs pourraient négliger les

informations habituellement nécessaires à la réalisation de la fonction déléguée. Deuxièmement, ils pourraient négliger la supervision de l'activité réalisée par la machine. Troisièmement, ils pourraient négliger les corrections des actions réalisées par la machine. Tous ces mécanismes résultent en un désinvestissement de la fonction déléguée à la machine et mènent à des difficultés de reprise en main lorsque nécessaire.

Le phénomène de contentement peut être identifié par sa conséquence finale, à savoir des difficultés de reprise en main du contrôle de la fonction déléguée à une assistance à la conduite automobile. Ces difficultés de reprise en main apparaissent, même si aucune résistance physique n'est offerte par le dispositif d'assistance. Afin de mettre en évidence des difficultés de reprise en main, la méthode la plus classiquement utilisée consiste à placer les conducteurs dans une situation où le dispositif d'assistance est invalide. Par exemple, Stanton et al. (2001), lors d'une étude sur simulateur avec un ACC, ont introduit des freinages brusques du véhicule précédant le véhicule conduit. Un nombre de collisions plus élevé a été observé avec l'usage de l'ACC qu'en condition non assistée (pour plus de détails, voir la partie II.2.2 du cadre général sur le phénomène de contentement). Dans cette étude, un dispositif de type RPL a également été évalué, les auteurs rapportent également une augmentation de la fréquence de collisions avec cette assistance, bien que deux fois moindre que celle observée avec l'ACC. Sur piste d'essai et avec une assistance identique à celle qui a été utilisée dans notre étude, Hoc et al. (2006) ont étudié les manœuvres d'évitement faisant suite à l'apparition inattendue d'obstacles. Le dispositif d'assistance étant programmé pour maintenir le véhicule dans sa voie de circulation lorsque celle-ci est dégagée n'était pas en mesure de prendre en charge l'évitement des obstacles. Les conducteurs étaient informés qu'en cas d'apparition d'obstacles ils devaient les contourner. En comparaison à une condition sans assistance, les évitements d'obstacles étaient réalisés avec de plus grandes amplitudes des mouvements de volant et une durée d'évitement réduite. Ces résultats indiquent une réponse plus brutale lors de la survenue d'obstacles, en lien avec des difficultés de reprise en main.

Que ce soit avec un régulateur de vitesse et d'inter-distance (ACC) ou avec un régulateur de position latérale (RPL), en cas de mise en situation d'invalidité du dispositif, les conducteurs doivent premièrement prendre la décision de reprendre le véhicule en contrôle manuel, puis réaliser les actions nécessaires au contrôle. En l'absence du dispositif d'assistance, les conducteurs doivent simplement réaliser les actions nécessaires au contrôle. Cette différence pourrait expliquer des temps de réponse plus importants et des actions plus brutales. Dans ce cas, le phénomène de contentement est lié au fait que les conducteurs ne supervisent pas convenablement la fonction déléguée ou, au minimum, ne sont pas préparés à agir sur la fonction déléguée. La première étude de la partie expérimentale 1 a mis en évidence qu'il n'y avait pas de difficultés de ce type avec des systèmes d'avertissement aux sorties de voie. Le dispositif d'assistance critiquait alors simplement la manœuvre d'évitement entreprise par

les conducteurs. Le phénomène de contentement semble donc être lié à la délégation d'une fonction de conduite. Parmi les trois domaines identifiés comme pouvant être affectés par le phénomène de contentement, reste alors la possible négligence des informations habituellement utiles à la réalisation de la fonction déléguée.

Land et Lee (1994) ont démontré qu'à l'approche et lors d'un virage, les conducteurs passent la majeure partie du temps à regarder dans la région du point tangent (figure 3). Ces résultats ont été confirmés à de nombreuses reprises (voir Wilson et al., 2007, pour un exemple récent). Par ailleurs, Mars (2006, 2008a) met en évidence l'étroite relation existant entre l'endroit où regardent les conducteurs et leur positionnement latéral sur la voie de circulation. Dans l'étude menée par Hoc et al. (2006), un test de mémoire implicite a été utilisé. Des logos avaient été placés à divers endroits sur la piste d'essai. Après la négociation d'un virage, il était parfois demandé aux conducteurs de reconnaître le logo présenté parmi des distracteurs. Sans le RPL, les logos placés à proximité du marquage au sol (sur lequel le point tangent se déplace) étaient les plus reconnus en proportion. En présence du RPL, ces logos étaient moins bien reconnus. Par conséquent, une suspicion de négligence des informations visuelles en présence du RPL, a été formulée par les auteurs. Cette négligence pourrait expliquer partiellement les difficultés de reprise du contrôle manuel. Dans le prolongement des travaux de Moray (2003), une telle négligence pourrait être liée à un défaut d'attention. Le problème de contentement pourrait davantage être un problème d'attention inappropriée (ici dans l'exploration visuelle) qu'un problème plus général relevant d'un défaut de détection des incidents. Cependant, la théorie de l'attention malléable de Young et Stanton (2002) prédit une diminution globale des ressources attentionnelles, en présence d'une assistance de type délégation de fonction.

L'objectif premier de cette expérimentation était de confirmer les difficultés de reprise en main liées à l'utilisation d'une assistance régulatrice de la position du véhicule, déjà enregistrées sur piste d'essai par Hoc et al. (2006). Ces difficultés avaient été observées lorsque le dispositif était mis en situation d'invalidité par l'introduction d'un obstacle sur la chaussée. La présente étude, sur simulateur de conduite, devait permettre d'affiner la description de ces difficultés de reprise en main, avec un faisceau de variables explicatives plus important. Le deuxième objectif de cette étude était de tester l'hypothèse selon laquelle les difficultés de reprise en main pourraient être liées à la négligence des informations utiles au maintien du véhicule dans sa voie, en présence du RPL. Ainsi, une diminution des prises d'information dans la région du point tangent, due au désinvestissement du conducteur de la tâche de contrôle latéral, pourrait expliquer en partie les difficultés de reprise en main.

II. METHODES

II.1 PARTICIPANTS

Dix-huit personnes (2 femmes et 16 hommes) se sont portées volontaires pour prendre part à cette expérience. L'âge moyen des conducteurs était de 27 ans (entre 21 et 49 ans), leur expérience de conduite variait entre 2 et 30 ans (9 ans en moyenne) et ils parcouraient 9185 km par an, en moyenne. Tous avaient une vue normale ou corrigée et aucun n'a été victime du mal du simulateur.

II.2 MATERIEL

II.2.1 *Simulateur de conduite*

L'étude a été menée sur le même simulateur à base fixe (Sim², développé par l'équipe MSIS à l'INRETS) que pour la première expérimentation de la partie expérimentale 1. La scène visuelle était projetée sur un écran de 2.40 m de large sur 1.91 m de haut, vue d'une distance d'environ 2 m (soit 62°x51° en angle visuel). La cabine de simulation était composée d'une boîte de vitesse manuelle, d'un volant à retour de force ainsi que des trois pédales usuelles : une pédale d'accélérateur, une pédale de frein et une pédale d'embrayage. Un compteur de vitesse était projeté en bas à gauche de la scène visuelle (voir Figure 3 pour une représentation de la scène visuelle).

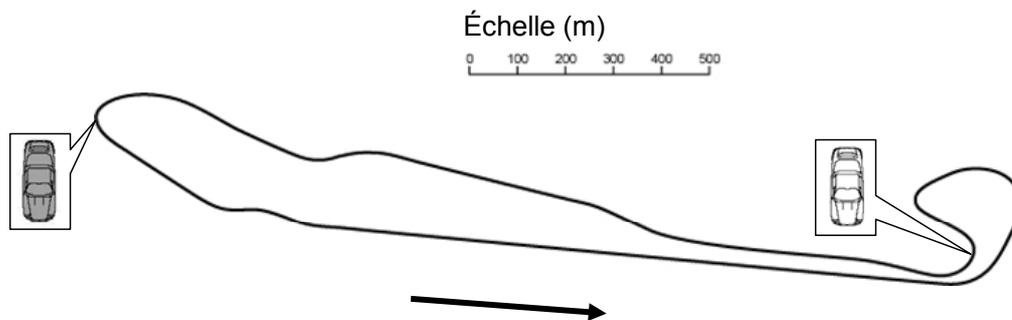


Figure 52. Tracé du circuit utilisé. La flèche indique le sens de circulation et les deux voitures les endroits d'évitement d'obstacles potentiels. Le véhicule gris correspond à l'obstacle 1 (moins surprenant car visible assez tôt) et le véhicule blanc correspond à l'obstacle 2 (plus surprenant).

La base de données visuelle utilisée est une modélisation de la piste d'essai du GIAT à Satory (Versailles). Le tracé de cette piste correspond à une route départementale d'environ 3.4 km composée de 15 lignes droites et de 14 virages de rayons de courbure et de longueurs variés (Figure 52). La chaussée comprenait deux voies de circulation opposées. Ce circuit offrait une

bonne visibilité de la route aux conducteurs car les bords de voie sont principalement composés d'herbe courte.

II.2.2 Oculomètre

Un oculomètre IviewX (Sensomotoric Instruments) a été utilisé afin d'enregistrer les mouvements oculaires des participants. Ce dispositif était composé d'un casque placé sur la tête des conducteurs (Figure 53), comprenant trois éléments principaux :

- un dispositif permettant de déterminer la position du casque et donc de la tête des participants dans l'espace ;
- une caméra chargée de filmer (par reflet) l'œil droit des participants. Les déplacements de l'œil dans son orbite étaient ensuite calculés relativement à un point de référence, acquis au moyen de la projection d'un rayon infrarouge sur l'œil ;
- et une caméra filmant la scène visuelle permettant à l'expérimentateur d'avoir « en direct » le positionnement du regard des conducteurs dans la scène visuelle.

Après une procédure de calibrage à la fois du marqueur de position de la tête et du déplacement du regard des conducteurs dans la scène visuelle, le système était en mesure d'offrir une précision de l'ordre du degré sur l'ensemble de la scène visuelle, avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz.

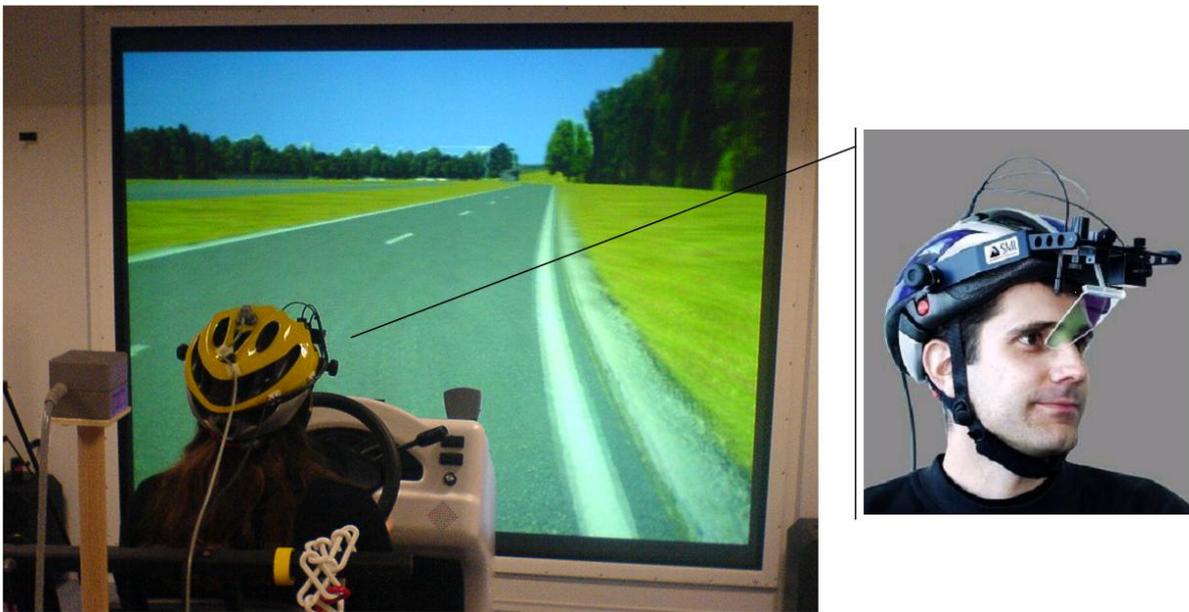


Figure 53. Illustration d'un participant équipé de l'oculomètre en situation de conduite et du casque oculométrique utilisé vu de face.

Le calibrage du marqueur de position de la tête des participants se faisait par triangulation. Les coordonnées d'un point fixe dans l'espace (référence fixe) ainsi que les coordonnées du

marqueur de position de la tête des participants étaient connues. La procédure de calibrage consistait principalement en l'enregistrement des coordonnées d'un autre point, situé à une distance connue de la référence fixe. Ceci permettait le calcul de la position de la tête des conducteurs relativement à la référence fixe, aussi longtemps que le casque restait en place sur la tête des conducteurs. Concernant le calibrage des déplacements du regard dans la scène visuelle, les conducteurs étaient invités à adopter une position de conduite confortable en tenant le volant. Il leur était ensuite demandé de déplacer leur regard sur une séquence de 13 points de référence répartis sur l'ensemble de la scène visuelle.

II.3 ASSISTANCE UTILISEE

L'assistance utilisée est la transposition sur simulateur, par l'équipe MSIS, d'un dispositif développé par le LIVIC, sur des véhicules réels. Sur la base du marquage au sol et du calcul continu de l'angle volant souhaitable, un automate contrôle la position latérale du véhicule en agissant directement sur la colonne de direction du véhicule. Pour plus de détails voir Chaib, Netto, et Mammar (2004) et Netto et al. (2003).

L'assistance au contrôle latéral (RPL) utilisée pour cette expérimentation prenait complètement en charge le contrôle latéral du véhicule, en l'absence d'obstacles sur la chaussée. Le contrôle longitudinal du véhicule (accélération et freinage) n'était en revanche pas assisté. La figure 54 représente de manière schématique les transitions entre l'assistance en fonction (active) et l'assistance désengagée (inactive). Lorsque l'assistance est active, elle gère la position latérale du véhicule en agissant directement sur la colonne de direction du véhicule. Du point de vue des conducteurs, l'assistance a le contrôle du volant. Les conducteurs ont alors deux possibilités : soit les actions menées par l'assistance leur conviennent, soit ce n'est pas le cas. Si les conducteurs sont satisfaits, ils n'exercent aucune force sur le volant et l'assistance continue à fonctionner normalement. Dans le cas contraire, lorsque les conducteurs sont en désaccord avec la gestion du positionnement latéral, il leur suffit alors de tourner le volant, sans effort notable, afin de désactiver l'assistance et de reprendre en main le contrôle latéral de leur véhicule. Si tel a été le cas, l'assistance n'a plus aucun effet et ces derniers doivent de nouveau gérer pleinement leur position sur la voie. L'assistance demeure inactive aussi longtemps que les conducteurs restent en dehors de leur voie de circulation. A contrario, dès qu'ils restent plus de deux secondes sur leur voie de circulation, l'assistance est réactivée. L'état de l'assistance (active) était signifié aux conducteurs via la présence d'un carré vert en bas à droite de la scène visuelle.

Il est important de préciser les limites de validité du système d'assistance utilisé. Ce dernier est en mesure de faire évoluer un véhicule sur une route, quel qu'en soit le tracé. En revanche, la conception de cette assistance n'intègre ni la détection d'obstacles sur la chaussée ni, *a fortiori*, leur évitement.

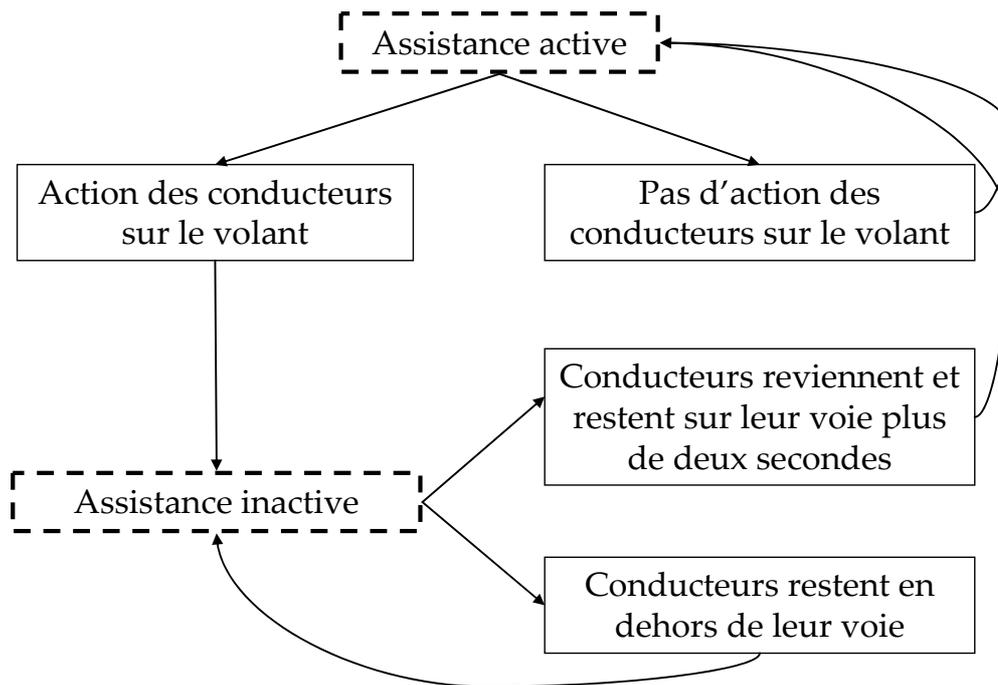


Figure 54. Deux états et transitions entre états pour l'assistance utilisée (régulateur de position latérale).

II.4 PROCEDURE

L'expérience durait environ 100 minutes, la mise en place et la procédure de calibrage de l'oculomètre nécessitant à elle seule environ 25 minutes. Après avoir pris place sur le simulateur de conduite, avoir été équipés de l'oculomètre, les conducteurs étaient informés du déroulement de l'expérience et des consignes à respecter. Ainsi, il leur était demandé de respecter les limitations de vitesse (relatives aux panneaux présents sur la piste), de garder les mains sur le volant et de conduire sur la voie de droite. Les conducteurs étaient également avertis de la possibilité de rencontrer un véhicule arrêté sur leur voie de circulation. Dans cette situation, il leur était demandé de ne pas chercher à s'arrêter derrière le véhicule, mais de le contourner (aucun véhicule n'arrivait en sens inverse à ce moment). L'expérimentateur informait également les conducteurs qu'ils auraient à conduire le véhicule sans assistance et avec une assistance.

Avant de commencer la phase expérimentale proprement dite, les conducteurs étaient invités à effectuer deux tours de piste sans assistance (environ 7 km), afin de se familiariser avec le simulateur. Le principe de fonctionnement de l'assistance était ensuite décrit. Par la suite, les conducteurs réalisaient sept tours de piste avec assistance et quatre tours de piste sans assistance. Un véhicule à l'arrêt, positionné au centre de la voie de circulation des conducteurs, apparaissait en deux positions du circuit (voir Figure 52) à la fois pour les tours avec assistance et pour les tours sans. Cette situation d'évitement d'obstacle, non prévisible

par les conducteurs, était programmée pour apparaître aux cinquième (obstacle 1) et septième (obstacle 2) tour, avec assistance, et au deuxième (obstacle 1) et quatrième (obstacle 2) tour, sans assistance. L'obstacle 1 apparaissait en virage à gauche de 73 m de rayon de courbure moyen, tandis que l'obstacle 2 survenait en virage à droite de 80 m de rayon de courbure moyen. De par le positionnement des obstacles sur le circuit, l'obstacle 1 était visible plus à l'avance que l'obstacle 2. L'ordre de présentation des tours avec et sans assistance a été contrebalancé : la moitié des participants a commencé l'expérimentation par les tours avec assistance et l'autre moitié par les tours sans assistance. Voir les annexes pour une présentation plus détaillée du plan expérimental.

Tout au long de cette étude, un trafic sur la voie de gauche était présent. Les conducteurs croisaient cinq à six véhicules (camions, motos et voitures) par kilomètre de route parcouru. L'ensemble de ces véhicules se déplaçait à une vitesse de 60 km/h. Toutefois, la programmation de ce trafic était générée de manière à ne jamais avoir de véhicule juste avant et après l'apparition d'un obstacle. En conséquence, les conducteurs n'avaient jamais à gérer leurs manœuvres de contournement en fonction d'autres véhicules arrivant sur la voie de circulation opposée.

II.5 ANALYSE DES DONNEES

Pour cette étude, trois types de variables ont été prises en considération. Le premier type de variable d'intérêt est en lien direct avec le comportement des conducteurs sur les commandes du véhicule. Les vitesses de conduite spontanées adoptées par les conducteurs nous ont renseignés sur l'activité de guidage en général. Les autres variables étudiées portent sur la situation d'évitement des obstacles. Le temps avant collision (entre le véhicule conduit et l'obstacle), au moment du franchissement de la ligne centrale et le temps passé par les conducteurs sur la voie de gauche lors de l'évitement de l'obstacle ont été calculés, ainsi que la taille de la correction (amplitude de la correction au volant) et l'énergie investie par les conducteurs dans la réponse (pics d'accélération au volant). Finalement, nous avons analysé les écarts latéraux maximum opérés par les conducteurs sur la voie de gauche, lors de l'évitement de l'obstacle.

L'enregistrement des stratégies visuelles a également fait l'objet d'une analyse. Les traitements se sont portés sur les positions du regard relativement au point tangent, toutes les 20 ms (en lien avec la fréquence d'acquisition de 50 Hz offerte par l'oculomètre). Du fait du rôle important joué par le point tangent dans le contrôle latéral, les coordonnées de chaque position du regard ont été rapportées à un repère orthonormé centré sur le point tangent (Figure 55). Ce repère était donc mobile à mesure que se déroulait le scénario, mais présentait la même signification d'une image à l'autre. En associant à chaque position un vecteur, dont l'origine était le point tangent et l'extrémité la position du regard, nous avons

analysé les angles formés par ces vecteurs avec l'axe des abscisses (sens inverse des aiguilles d'une montre) et les longueurs de ces vecteurs (distances au point tangent).

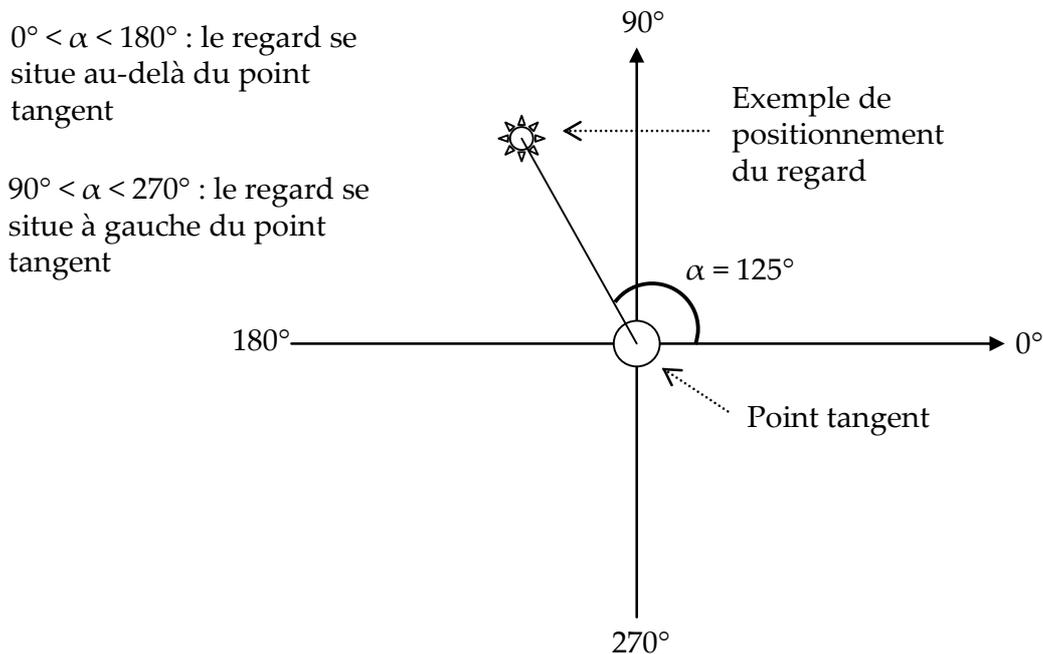


Figure 55. Position angulaire du regard relativement au point tangent : exemple d'une position du regard à 125° .

Ces variables comportementales ont donné lieu à des analyses fiduciaires (Lecoutre & Poitevineau, 1992 ; Rouanet, 1996), en complément des tests de signification usuels. Ces statistiques permettent d'inférer la taille de l'effet sur la population de référence (δ) et ce à partir des effets observés (d). Un seuil de garantie (probabilité) de .90 a été utilisé pour calculer ces tailles d'effet. Pour plus de détails sur les analyses fiduciaires, se référer à la partie II.2.5 de la première partie expérimentale.

Les verbalisations spontanées des conducteurs en situation de conduite ont été également recueillies. Sur la base d'une classification générale (Hoc, 2003) utilisée dans l'expérience sur piste menée par Hoc et al. (2006), les verbalisations en lien avec la coopération homme-machine ont été catégorisées en quatre sous-ensembles :

- les verbalisations relatives à une coopération dans l'action (répertoriant à la fois les interférences positives et les interférences négatives),
- les verbalisations relatives à la coopération dans la planification (élaboration et maintien d'un référentiel commun de l'équipe homme-machine),
- les verbalisations relatives à la méta-coopération (élaboration et usage de modèles de l'assistance, du conducteur ou de leur interaction), incluant les verbalisations explicites du phénomène de contentement.

III. RESULTATS

III.1 COMPORTEMENTS DES CONDUCTEURS SUR LES COMMANDES DU VEHICULE

Les résultats recueillis lors des contournements des obstacles 1 et 2 sont très similaires pour l'essentiel des variables. Les analyses statistiques ont donc été réalisées sur les données des deux obstacles regroupés, à une exception près : les durées de contournement. La Figure 56 présente les résultats recueillis lors du contournement d'un obstacle avec et sans assistance.

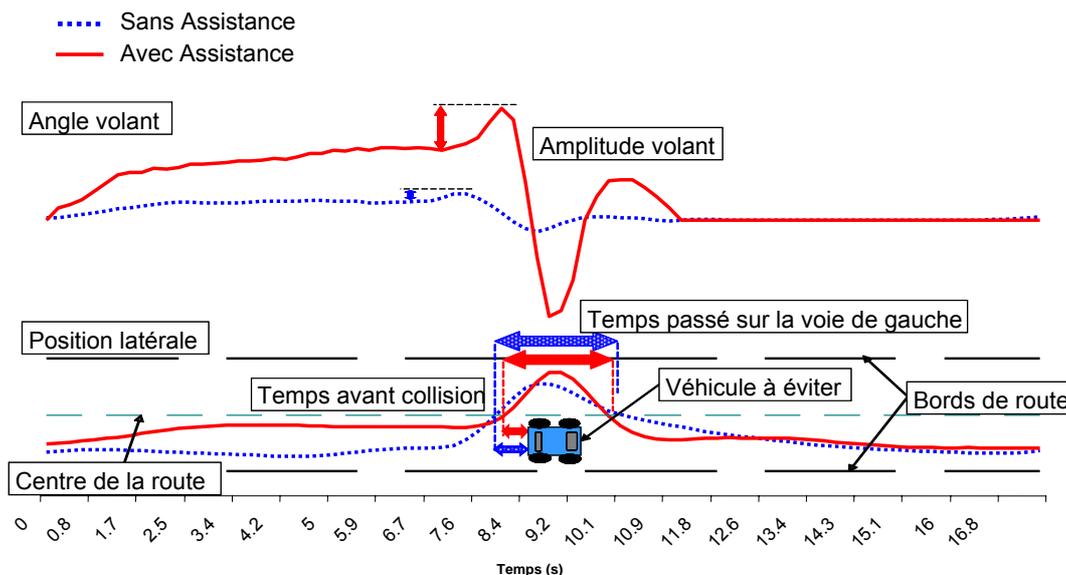


Figure 56. Exemple représentatif d'un contournement d'obstacle dans un virage à gauche (obstacle 1) avec et sans assistance.

III.1.1 Vitesses de conduites spontanées

Les conducteurs ont conduit notablement plus vite (environ 10 %) en présence de l'assistance qu'en son absence ($d = 5.9$ km/h ; $t(16) = 2.51$; $p < .03$; $\delta > 2.8$ km/h ; Figure 57). Cette augmentation de vitesse est importante lorsque la condition avec assistance précède la condition sans assistance ($d = 9.8$ km/h ; $t(8) = 2.40$; $p < .05$; $\delta > 4.1$ km/h). Il n'est en revanche pas possible de conclure lorsque les tours assistés succèdent aux tours qui ne le sont pas ($d = 2.0$ km/h ; $t(8) = 0.86$; $p = .41$).

Toutefois, il est à noter que les vitesses de conduites spontanées enregistrées lors des deux virages où une manœuvre potentielle d'évitement était possible, ne diffèrent pas significativement ($d = 0.6$ km/h ; $t(16) = 0.38$; $p = .70$). Les conducteurs roulaient légèrement moins vite avec assistance, mais les analyses fiduciaires ne permettent pas de conclure à un effet parent négligeable.

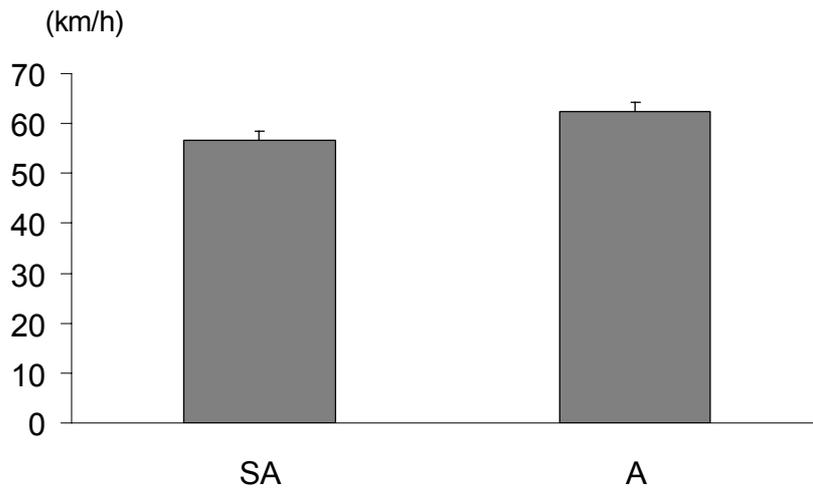


Figure 57. Vitesses de conduites spontanées moyennes pour les conditions sans assistance (SA) et avec assistance (A) ; les barres d'erreur représentent les erreurs types.

III.1.2 Temps avant collision (TTC)

L'assistance réduit les TTC, marquant l'initiation du contournement, de façon significative et notable ($d = 262$ ms ; $t(16) = 2.78$; $p < .02$; $\delta > 136$ ms ; Figure 58). Cette réduction est de l'ordre de 10%.

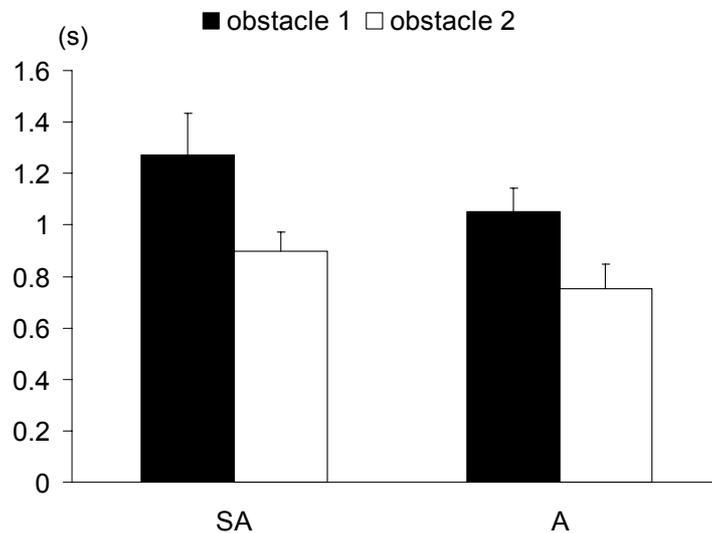


Figure 58. Temps avant collision moyens, lors de l'évitement des obstacles, pour les conditions sans assistance (SA) et avec assistance (A), les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Quelle que soit la condition d'assistance, le TTC est notablement plus grand (environ 20%) pour l'obstacle dont le contournement est facile à anticiper (obstacle 1) que pour l'autre obstacle ($d = 344$ ms ; $t(16) = 3.78$; $p < .002$; $\delta > 222$ ms).

III.1.3 Durées de contournement

Les résultats relatifs au temps passé sur la voie de gauche dépendent de l'ordre de passation des conditions avec et sans assistance (Figure 59). Il n'est donc pas justifié de donner un résultat global indépendant de cet ordre de passation. Quand la condition avec assistance précède la condition sans assistance, les durées de contournement sont significativement et notablement plus élevées avec assistance que sans ($d = 320$ ms ; $t(8) = 2.22$; $p < .06$; $\delta > 119$ ms). Il est inféré un allongement des durées de contournement d'environ 5%. Quand la condition avec assistance succède à la condition sans assistance, aucune différence significative ou notable ne peut être inférée ($d = 457$ ms ; $t(8) = 1.17$; $p = .27$), malgré une tendance descriptive à la baisse.

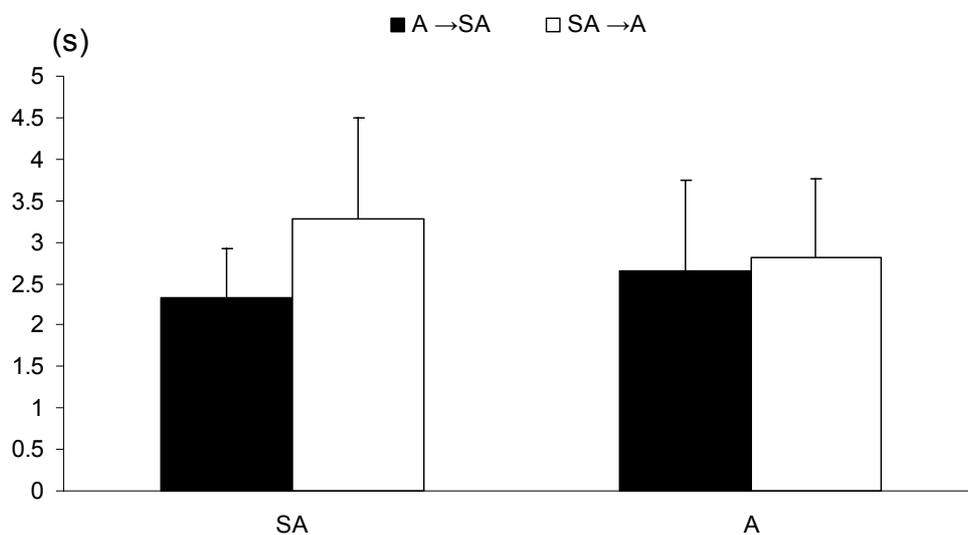


Figure 59. Durées moyennes de contournement lors de l'évitement des obstacles, pour les conditions sans assistance (SA) et avec assistance (A) ; les barres d'erreur représentent les erreurs types.

III.1.4 Amplitude des corrections au volant

Globalement, l'assistance accroît l'amplitude de la correction au volant de façon significative et notable par rapport à la condition sans assistance ($d = 24.4^\circ$; $t(16) = 4.27$; $p < .001$; $\delta > 16.8^\circ$; Figure 60). Il est possible d'inférer une correction de plus de 33% plus ample.

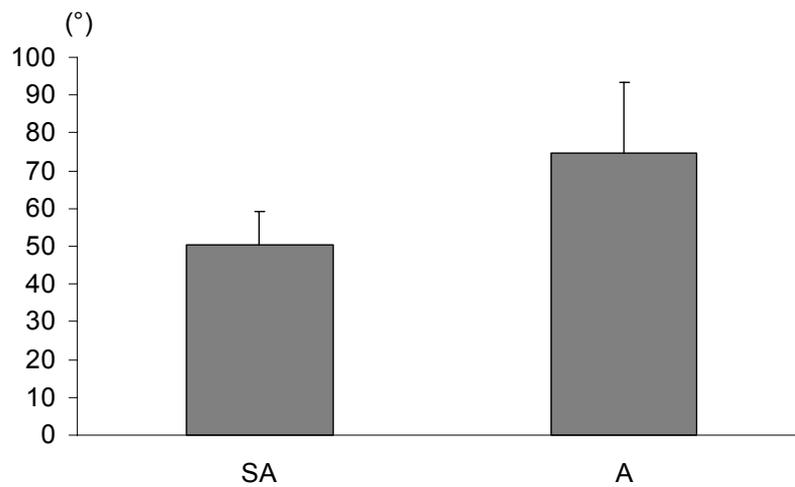


Figure 60. Amplitudes moyennes des corrections au volant pour éviter des obstacles sans assistance (SA) et avec assistance (A), les barres d'erreur représentent les erreurs types.

III.1.5 Pics d'accélération au volant

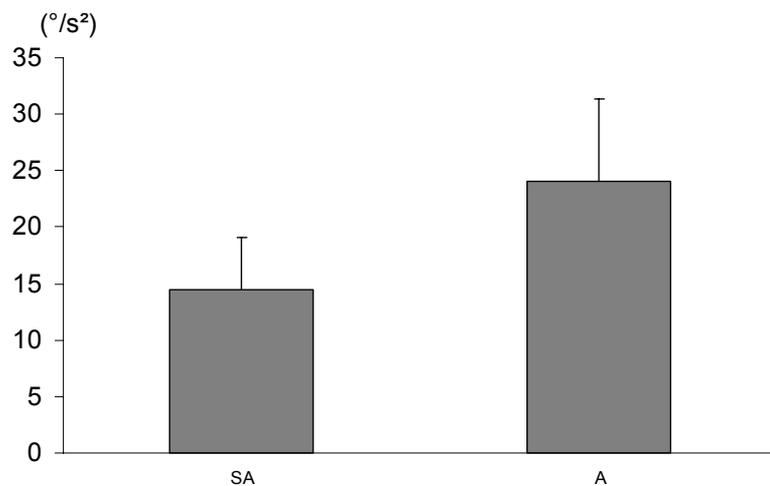


Figure 61. Pics d'accélération au volant moyens lors de l'évitement des obstacles, pour les conditions sans assistance (SA) et avec assistance (A), les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Globalement, comme pour les amplitudes des corrections, les pics d'accélération au volant sont significativement et notablement plus importants pour la condition avec assistance que pour la condition sans assistance ($d = 9.6^\circ/s^2$; $t(16) = 4.99$; $p < .001$; $\delta > 7.0^\circ/s^2$; Figure 61). Une augmentation de près de 50% est inférée.

III.1.6 Écart latéral maximum

En moyenne, les conducteurs ont réalisé un écart latéral maximum sur la voie de gauche significativement plus important avec assistance que sans ($d = 0.90$ m ; $t(16) = 3.89$; $p < .002$; $\delta > 0.59$ m ; Figure 62). Ceci est vrai quel que soit l'ordre de passation. L'accroissement inféré est supérieur à 40%.

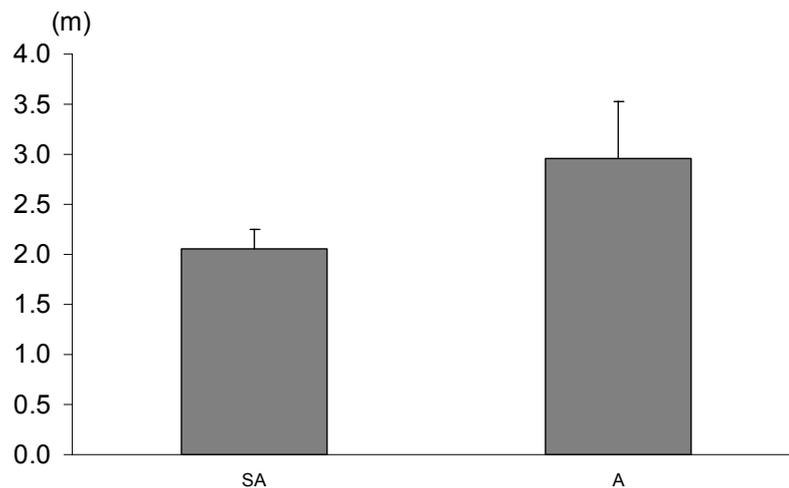


Figure 62. Moyennes des écarts latéraux maximum sur la voie de gauche lors de l'évitement des obstacles, pour les conditions sans assistance (SA) et avec assistance (A); les barres d'erreur représentent les erreurs types. Sur le graphique, 0 m correspond au centre de la route et 3.5 m au bord gauche de la route.

III.2 ANALYSE DES STRATEGIES VISUELLES

Les analyses oculométriques ont porté sur les virages où la survenue d'un obstacle était possible, mais dans le cas où il n'y avait pas d'obstacle. La figure 63 présente un exemple des données recueillies sur un virage à gauche pour le même sujet sans et avec assistance.

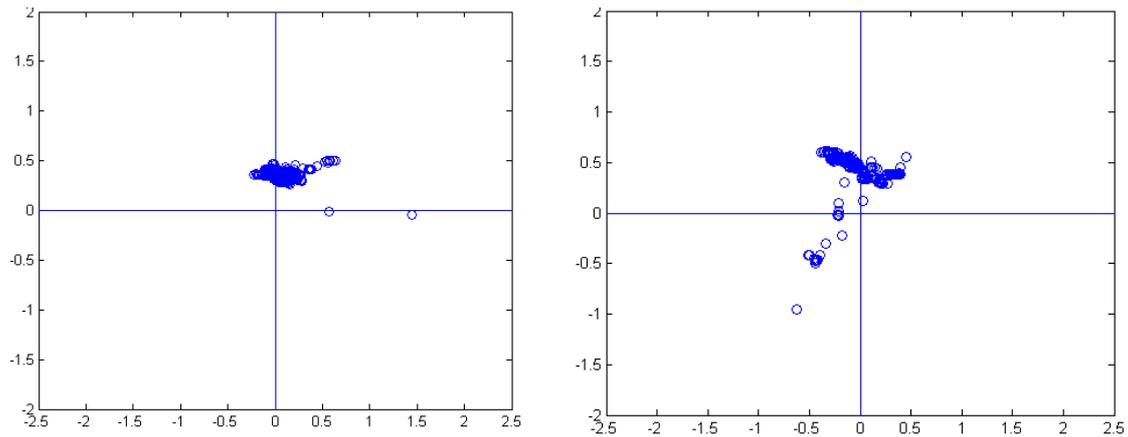


Figure 63. Exemple d'un patron de positionnement du regard en rapport au point tangent qui correspond à l'origine du repère, sans (à gauche) et avec assistance (à droite). Pour un conducteur en virage à gauche. Les unités sont en m.

III.2.1 Virage à gauche (obstacle 1)

Sans assistance, les conducteurs regardaient l'écran à 45 cm en moyenne au-delà du point tangent (Figure 64). Aucune différence significative ou notable n'est apparue entre les conditions avec et sans assistance ($d = 0.003$ m ; $t(16) = 0.13$; $p = .90$; $|\delta| < 0.04$ m).

Sans assistance, l'angle moyen était de 97° , donc légèrement sur la gauche du point tangent (Figure 64). Le positionnement moyen du regard des conducteurs était significativement et notablement plus à gauche avec l'assistance que sans assistance ($d = 7.8^\circ$; $t(16) = 3.81$; $p < .002$; $\delta > 5.1^\circ$; Figure 64). Comparativement à la condition sans assistance, il est possible d'inférer une position du regard de plus de 17 cm à gauche du point tangent (en direction de la voie de circulation opposée) avec l'assistance.

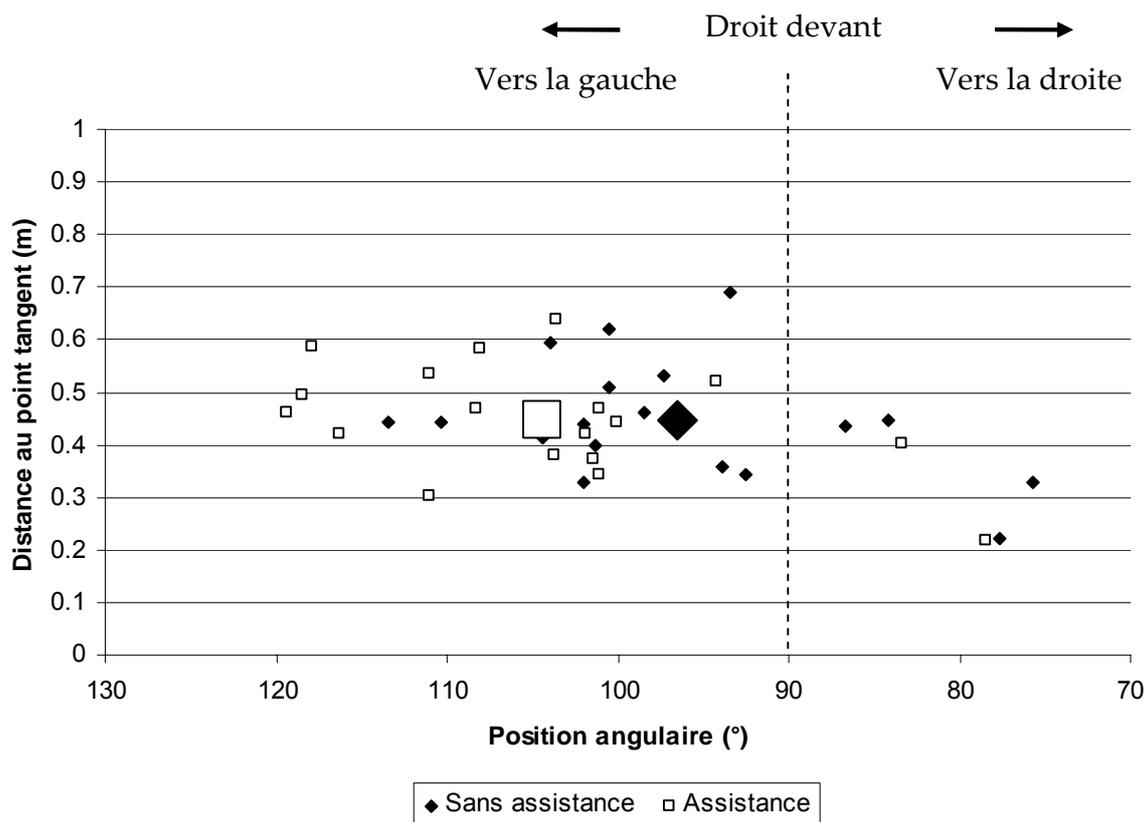


Figure 64. Positions moyennes du regard des 18 conducteurs relativement au point tangent (en virage à gauche), en angle et en distance. Les gros points représentent les positions moyennes des groupes. 90° correspond à une position en face du point tangent.

III.2.2 Virage à droite (obstacle 2)

Sans assistance, et en moyenne, les conducteurs regardaient l'écran à 58 cm au-delà du point tangent (Figure 65). Aucune différence significative n'est apparue entre les conditions avec et sans assistance, mais il n'est pas possible de conclure à un effet vraiment négligeable ($d = 0.048 \text{ m}$; $t(16) = 1.09$; $p = .29$; $|\delta| < 0.107 \text{ m}$).

Sans assistance, la position angulaire moyenne du regard des conducteurs était de 103°, donc à gauche du point tangent (Figure 65). Le positionnement moyen du regard des conducteurs était significativement et notablement plus à droite avec l'assistance ($d = 11.5^\circ$; $t(16) = 4.67$; $p < .0002$; $\delta > 8.2^\circ$). Comparativement à la condition sans assistance, il est possible d'inférer un regard positionné à plus de 40 cm à droite (en direction du bord de route) avec assistance.

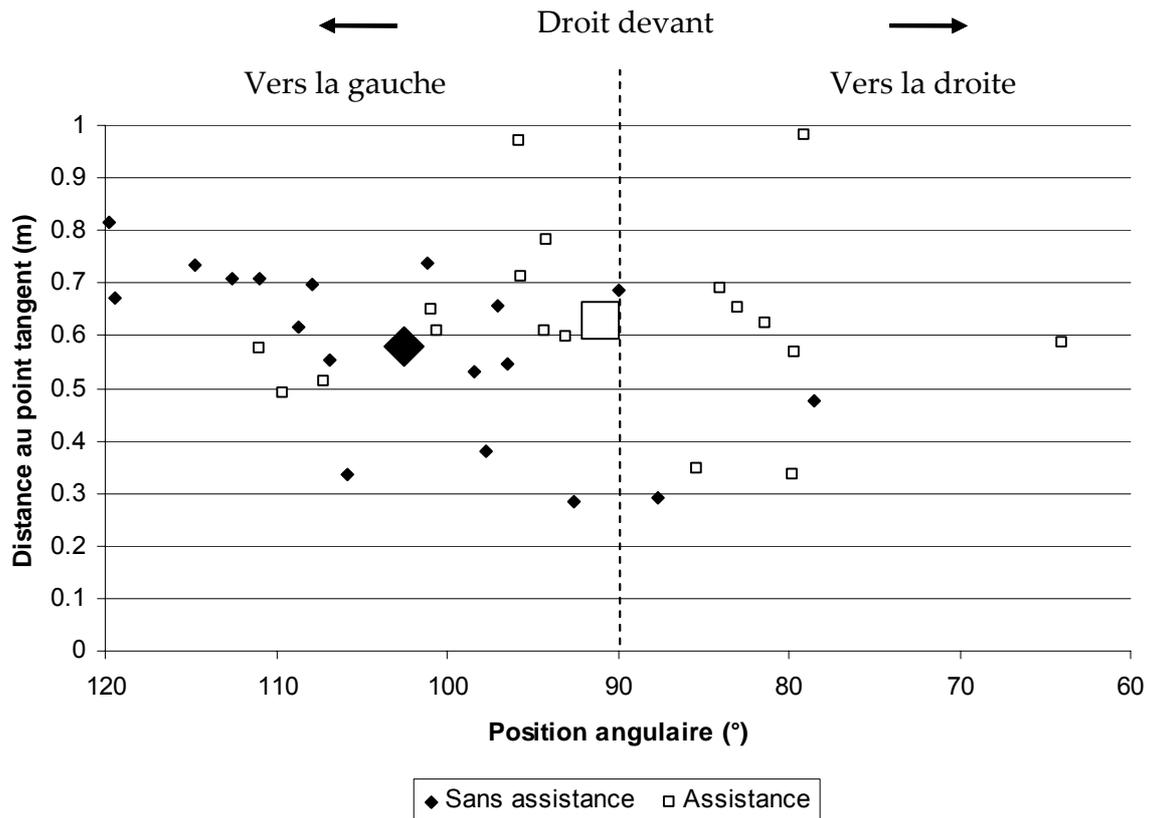


Figure 65. Positions moyennes du regard des 18 conducteurs relativement au point tangent (*en virage à droite*), en angle et en distance. Les gros points représentent les positions moyennes des groupes. 90° correspond à une position en face du point tangent.

III.3 VERBALISATIONS SPONTANÉES RELATIVES À LA COOPÉRATION HOMME-MACHINE

La figure 66 présente la distribution de l'ensemble des verbalisations liées à la coopération homme-machine. La part relative des verbalisations liées à chaque catégorie est exprimée en pourcentage du total. Les participants évoquent essentiellement des éléments entrant dans les catégories de « méta-coopération » et de « coopération dans l'action », avec respectivement 58.5% et 34.1% des verbalisations.

Concernant la coopération dans l'action, les conducteurs soulignent nettement la gêne occasionnée par l'assistance (près de 27% des verbalisations), tandis que les expressions de facilitation sont plus rares (environ 7% des verbalisations).

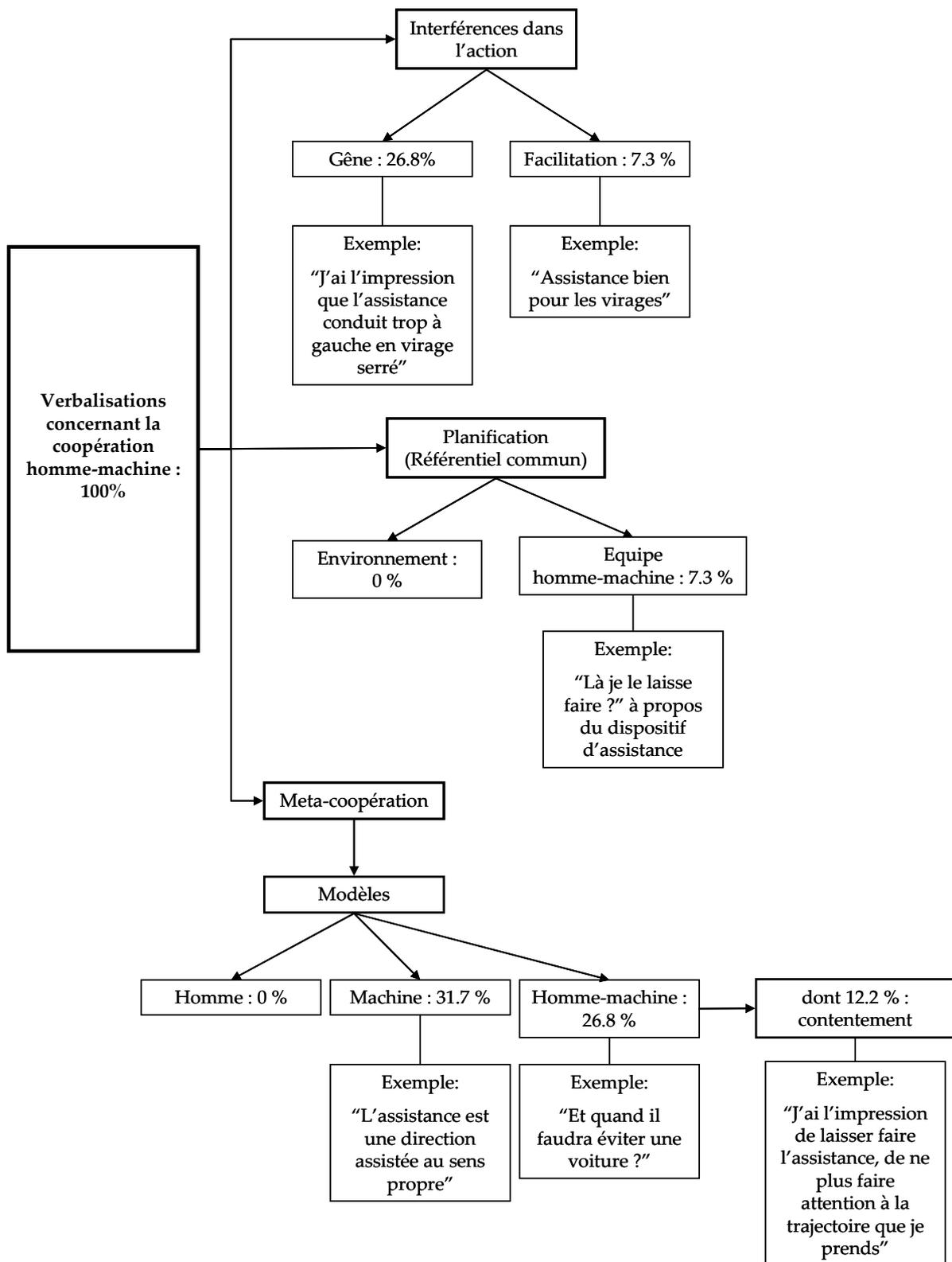


Figure 66. Répartition des verbalisations selon les différents types d'activité de coopération homme-machine telles que décrites par Hoc (2003).

Au niveau de la méta-coopération, les conducteurs évoquent de manière équilibrée les règles de fonctionnement de la machine et de l'interaction homme-machine. Au sein des verbalisations liées à l'interaction homme-machine, une part importante (environ la moitié) est directement liée au phénomène de contentement.

Finalement, il y a peu de verbalisations (environ 7%) liées à l'élaboration et au maintien d'un référentiel commun entre l'assistance et les conducteurs. Ces verbalisations portent sur la répartition des fonctions entre les conducteurs et le dispositif.

IV. DISCUSSION

Le centre d'intérêt de cette étude ne portait pas sur l'évaluation de l'efficacité de la régulation automatique du contrôle latéral en lui-même. Il est en effet évident que l'usage d'un régulateur de position latérale fiable évite aux conducteurs de se trouver dans des situations critiques telles qu'une sortie de voie (dans la limite de l'adhérence du véhicule à la chaussée). Cet effet bénéfique de l'assistance sur le maintien du véhicule dans sa voie de circulation étant entendu, notre étude visait à en appréhender d'éventuels effets néfastes. De fait, notre intérêt s'est porté sur une mise en situation d'invalidité de l'assistance, à savoir l'évitement d'un obstacle. Les résultats recueillis montrent clairement des difficultés de reprise en main du contrôle latéral du véhicule lors de la mise en situation d'invalidité de l'assistance. De manière concomitante, des modifications dans les stratégies de prise d'informations visuelles ont été observées. Ainsi, en condition assistée, les conducteurs regardent en moyenne plus à droite en virage à droite, et plus à gauche en virage à gauche.

La mise en situation d'invalidité de l'assistance, via le placement d'obstacles sur la voie de circulation, confirme clairement l'apparition de difficultés de reprise en main du contrôle latéral, déjà observées par Hoc et al. (2006). Le faisceau de variables analysées dans l'expérience permet de caractériser finement ces difficultés de reprise en main. Ainsi, les conducteurs ont initié leurs manœuvres de contournement plus tardivement (réduction des temps avant collision, particulièrement pour l'obstacle le moins visible à l'avance). Les mouvements de volant initiateurs de l'évitement, étaient plus franc, aussi bien de par leur taille (amplitude des corrections) que de par leur vivacité (pics d'accélération). Ces mouvements de volant plus énergiques et de tailles plus importantes, résultent en des trajectoires d'évitement plus amples. En effet, en présence de l'assistance, l'écart latéral maximum sur la voie de gauche, opéré par les conducteurs lors de l'évitement des obstacles, s'en trouvait largement augmenté. En revanche, l'assistance n'accroissait le temps total passé par les conducteurs sur la voie de gauche que dans le cas où elle était proposée dès le début de l'expérimentation, avant la situation sans assistance. Cependant, même à temps égal passé sur la voie de gauche, étant donné l'initiation plus tardive du contournement avec assistance, les conducteurs passaient plus de temps sur la voie de gauche, après avoir franchi l'obstacle.

Ce temps supplémentaire après obstacle passé sur la voie de gauche, était probablement subi par les conducteurs. Il est probable que les participants aient cherché à revenir sur leur voie le plus rapidement possible, mais qu'en raison de l'écart latéral important sur la voie de gauche, le temps nécessaire ait été allongé.

Les conséquences négatives des difficultés de reprise en main, en termes de sécurité, sont évidentes, même si aucun cas de collision avec les obstacles n'a été recensé (comme en condition non assistée). Par exemple, si une sortie de route est considérée comme l'écart latéral maximum sur la voie de gauche (100%), l'écart latéral maximal moyen était de 84% avec l'assistance, contre simplement 59% sans assistance. Les verbalisations spontanées enregistrées n'ont révélé aucune hésitation sur l'agent en charge de la manœuvre d'évitement. Les conducteurs avaient donc intégré que la réalisation des manœuvres d'évitement leur incombait. Les difficultés de reprise en main que nous observons sont comparables aux difficultés d'éviter une collision, éprouvées avec un ACC lors du freinage brusque du véhicule précédant le véhicule conduit (Stanton et al., 2001). Ces difficultés sont liées au phénomène de contentement se traduisant par un désengagement du conducteur de la tâche déléguée. Avec l'ACC, les conducteurs se reposent sur la délégation du contrôle longitudinal du véhicule et interviennent donc difficilement lors d'un freinage d'urgence. Avec le RPL, les conducteurs se reposent sur la délégation du contrôle latéral, mais il est également possible qu'ils se reposent aussi plus largement, sur le dispositif d'assistance en lui-même, quelle que soit la fonction précise qu'il prenne en charge (freinage ou évitement). L'hypothèse des ressources attentionnelles malléables avancée par Young et Stanton (2002), correspondant à un déficit attentionnel général, pourrait être une bonne explication pour ce phénomène de contentement global, phénomène appuyé par l'augmentation des vitesses de conduite spontanées enregistrées en présence de l'assistance.

Notre hypothèse, basée sur les observations faites par Hoc et al. (2006), consistait à attribuer les difficultés de reprise en main au premier niveau du phénomène de contentement (négligence des informations visuelles habituellement nécessaires à l'exécution de la fonction déléguée). Cette hypothèse n'est pas véritablement confirmée par l'analyse des stratégies visuelles adoptées par les conducteurs. Les résultats obtenus indiquent des modifications globales en termes d'exploration visuelle lors de l'introduction de l'assistance, sans toutefois appuyer clairement une négligence des informations visuelles nécessaires au maintien du véhicule sur sa voie de circulation. L'analyse de la position du regard en virage révèle qu'en présence de l'assistance, les conducteurs tendent à décaler latéralement leur regard dans le sens du virage. Compte tenu de la perspective, ce décalage peut être relié à une anticipation plus importante sur la portion de route à venir, même si la distance moyenne du regard par rapport au point tangent reste similaire entre les conditions avec et sans assistance. Ainsi, en virage, la portion de route se situant en avant du véhicule s'appréhende principalement par un décalage latéral du regard, plus que par un décalage vertical (Figure 3). Dans le virage à

gauche, le décalage de la position moyenne du regard vers la gauche indique une redirection du regard vers la voie de circulation opposée. Dans le virage à droite, le décalage de la position moyenne du regard vers la droite permet aux conducteurs d'anticiper sur les événements à venir (ex. : trafic sur la voie de circulation opposée) en « coupant » visuellement le virage. Les modifications des stratégies visuelles faisant suite à l'introduction du régulateur de position latérale, semblent donc indiquer que les conducteurs redirigent leur centre d'intérêt visuel vers la voie de circulation opposée. Dès lors, il est envisageable que les conducteurs fassent le choix de moins s'intéresser aux événements survenant sur leur propre voie, en faveur d'événements survenant sur la voie de circulation opposée.

Cette modification laisserait à penser qu'en déléguant la gestion de la position latérale, la situation de conduite nécessiterait moins de prises d'informations visuelles relatives au maintien de la position latérale qu'en condition non assistée. Néanmoins, dans le cas du virage à gauche comme dans celui du virage à droite, les modifications des stratégies de prise d'informations visuelles ne peuvent pas être interprétées sans conteste comme une négligence de la région du point tangent. Les analyses n'ont effectivement pas montré une distance moyenne au point tangent plus grande en présence de l'assistance. Les modifications observées ne correspondent donc pas, avec certitude, à une négligence des informations visuelles utiles à la gestion à court terme de la trajectoire (zone du point tangent). Ces résultats, sans prouver définitivement le rôle de la prise d'information visuelle dans le phénomène de contentement, ne permettent pas de l'exclure complètement. Les changements observés semblent être la marque d'un désengagement des conducteurs de l'activité de guidage latéral du véhicule, sans pour autant témoigner d'une négligence de la région du point tangent.

Les adaptations comportementales négatives (difficultés de reprise en main) enregistrées demeurent toutefois. C'est très probablement sous ses deux autres formes que le phénomène de contentement s'est manifesté plus clairement : celle de la supervision de la fonction et celle de sa correction. Même si la supervision des actions de l'assistance se déroule normalement, le passage à la correction implique la superposition d'une décision de reprise (niveau tactique) du contrôle manuel et de l'exécution du contrôle (niveau opérationnel). En situation non assistée, il suffit d'exécuter le contrôle. Cette superposition peut expliquer à elle seule la réduction du temps avant collision et le caractère brutal subséquent de la réponse. Cette brutalité rend l'évitement plus dangereux à tous les niveaux. La marge de sécurité à l'obstacle (temps avant collision) est réduite, ce qui augmente le risque de collision. Le mouvement de volant plus brutal est également source de dangerosité car il peut amener plus facilement à une perte de contrôle du véhicule. Finalement, l'écart latéral important qui découle du mouvement de volant est susceptible de provoquer des sorties du côté gauche de la route.

Les vitesses de conduite spontanées sont une variable globale renseignant sur l'adaptation des conducteurs à l'assistance, considérée en dehors des situations d'invalidité de l'assistance. Malgré les limitations de vitesse, les conducteurs ont adopté des vitesses de conduite spontanées plus élevées en présence de l'assistance, surtout lorsque celle-ci était présentée avant la condition sans assistance. Hoedemaeker et Brookhuis (1998) ont montré une augmentation des vitesses de conduite spontanées de l'ordre de 8 km/h avec l'usage de l'ACC. Cette différence était observée pour des vitesses de conduites de l'ordre de 110 km/h alors que les conducteurs ne recevaient aucune consigne de vitesse. Dans notre étude, environ 6 km/h en moyenne séparent les conditions avec et sans assistance, mais pour des vitesses de conduite de l'ordre de 60 km/h. De plus, et contrairement à Hoedemaeker et Brookhuis (1998), l'assistance utilisée dans notre étude ne portait pas sur le contrôle longitudinal du véhicule. L'importante augmentation de vitesse observée met en avant l'étroitesse des relations entre les deux activités de guidage du véhicule que sont le contrôle longitudinal et le contrôle latéral. Ainsi, une modification de la gestion de l'une des deux activités de guidage engendre des modifications de l'autre. Cette relation est bilatérale puisque des variabilités de positionnement dans la voie plus importants qu'en condition contrôle ont été enregistrées avec l'usage de l'ACC (Hoedemaeker & Brookhuis, 1998 ; Rudin-Brown & Parker, 2004). Toutefois, dans une étude réalisée sur des véhicules réels (Hoc et al., 2006), les conducteurs étaient moins confiants dans le RPL et conduisaient moins vite avec l'assistance que sans. La confiance placée par les conducteurs dans le dispositif d'assistance pourrait affecter les marges de sécurité qu'ils se donnent. Lors de l'étude sur piste rapportée par Hoc et al. (2006), le danger en cas de défaillance du dispositif est réel, il est possible que la confiance dans le dispositif mette plus de temps à s'installer que sur simulateur, où le danger est virtuel. Pour conclure à de tels effets, il conviendrait de réaliser une étude où le régulateur de position latérale serait utilisé sur de plus longues périodes de temps.

Enfin, les verbalisations spontanées ont confirmé en grande partie celles recueillies par Hoc et al. (2006). Toutefois, les doutes sur la répartition des fonctions entre le conducteur et le dispositif ont été moins exprimés dans la présente étude. La majorité des verbalisations enregistrées relèvent de la construction de modèles du dispositif et de l'interaction entre le dispositif et le conducteur. Le pourcentage d'expressions explicites du contentement est relativement important (également plus important que dans l'étude menée par Hoc et al. (2006)) et conforte nos interprétations des difficultés de reprise en main du véhicule. Concernant les verbalisations des interférences dans l'action, une nette prédominance des interférences négatives sur les interférences positives a été enregistrée ; les interférences négatives retenant probablement plus facilement l'intérêt des conducteurs que les interférences positives. Très peu de verbalisations ont été formulées concernant la coopération dans la planification, contrairement à ce qui avait été observé sur véhicules réels

(Hoc et al., 2006). Cette différence s'explique par une meilleure compréhension des actions entreprises par le dispositif dans la présente étude.

V. CONCLUSION

Pour résumer, l'expérimentation rapportée ici confirme et clarifie l'apparition de difficultés de reprise en main avec un régulateur de position latérale dans une situation hors des limites de validité de la machine (évitement d'un obstacle). Ces difficultés ont été interprétées en rapport au phénomène de contentement exprimé spontanément par les conducteurs. Bien que des modifications dans les prises d'informations visuelles aient été identifiées, ces dernières ne peuvent pas être directement reliées au phénomène de contentement car elles ne sont pas directement interprétables en termes de négligence des informations habituellement utiles à la réalisation de la fonction déléguée. L'explication des difficultés de reprise en main lorsqu'une assistance régulant la position latérale est mise en situation d'invalidité réside probablement dans la superposition d'une tâche tactique (décision de reprendre en main le contrôle du véhicule) et d'une tâche opérationnelle (réalisation du contrôle manuel). Sans assistance, seule la tâche opérationnelle est requise. En conséquence, la reprise en main du contrôle de la direction lorsque l'assistance est active s'accompagne d'un délai de traitement supplémentaire. Compte tenu du caractère exceptionnel des situations mettant en invalidité l'assistance, il apparaît extrêmement difficile de réduire cette forme de contentement.

L'étude menée présente quelques limitations. Premièrement, nous n'avons réalisé qu'une analyse globale des positions du regard dans la scène visuelle. Bien qu'effectuée sur la base d'un repère dynamique et ayant pour origine le point tangent, particulièrement important lors de la négociation de virages, l'analyse portait uniquement sur la position moyenne du regard dans un virage donné. Une analyse des mouvements oculaires, image par image, aurait permis de caractériser les trajectoires visuelles de manière plus qualitative, et peut être de fournir des interprétations plus détaillées des différences observées entre les conditions avec et sans assistance. Deuxièmement, seuls les effets de l'assistance à court terme ont été abordés. L'évolution des adaptations comportementales sur de plus longues périodes de temps d'utilisation du régulateur de position latérale seraient les bienvenues.

Au-delà de son aspect pratique, cette étude est l'opportunité de contribuer à une meilleure compréhension du phénomène de contentement, phénomène largement répandu dans le domaine de la coopération homme-machine. Des analyses plus détaillées des mécanismes sous-tendant le phénomène de contentement et ses relations à l'attention seraient nécessaires. L'automatisation en conduite automobile convient particulièrement bien à l'étude de ces mécanismes pouvant avoir de sérieuses répercussions sur la sécurité des utilisateurs d'automobiles.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Mon projet de thèse a été financé par le ministère de l'éducation supérieure, de la recherche et de la technologie et réalisé dans le cadre du projet PREVENSON, soutenu par le programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (PREDIT 3). Ce projet de thèse s'inscrit ainsi dans une volonté gouvernementale d'améliorer la sécurité routière en conduite automobile. La thématique de la sécurité routière constitue donc le fil conducteur de ce travail de thèse. Cette thématique implique à la fois des enjeux matériels, économiques et humains importants. L'angle d'approche choisi pour aborder la problématique de l'assistance à la conduite automobile place nos travaux à la croisée de la psychologie cognitive expérimentale et de l'ergonomie. La conception de nos travaux expérimentaux a ainsi été guidée par la volonté de répondre aux questions pratiques posées par l'assistance à la conduite d'une part, et par la volonté de mieux comprendre l'agent humain en situation de coopération homme-machine au travers de l'étude de la situation de conduite automobile d'autre part. Les résultats obtenus nous ont donc permis de tirer des conclusions pratiques en termes d'efficacité des dispositifs d'assistance considérés, mais également plus fondamentales concernant les comportements des individus en situation de coopération homme-machine.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à caractériser l'activité de conduite et celle des conducteurs. Compte tenu de la complexité et de la variété des tâches constituant l'activité de conduite, la survenue d'erreurs génératrices d'accidents est inhérente à l'activité. Les assistances à la conduite apparaissent dès lors comme une possibilité d'aider les conducteurs à réduire le nombre d'erreurs commises et donc le nombre d'accidents. L'introduction d'assistances à la conduite entraîne des modifications dans le comportement des conducteurs que nous avons appréhendées au travers du cadre de la coopération homme-machine. Les parties expérimentales se sont focalisées sur deux catégories d'assistances (contrôle mutuel et délégation de fonction) ayant des effets distincts sur l'activité de conduite et par conséquent sur les conducteurs. D'un point de vue pratique, les systèmes d'avertissement aux sorties de voie (contrôle mutuel) se situent actuellement au cœur des préoccupations des constructeurs automobiles. Une des deux études portant sur ces dispositifs a d'ailleurs été réalisée en collaboration avec le constructeur automobile français Renault. Toujours d'un point de vue pratique, le régulateur de position latérale (délégation de fonction) est plus avant-gardiste et ne fait pas partie des intérêts immédiats des constructeurs automobiles français. D'un point de vue plus fondamental, l'usage d'un dispositif de type délégation de fonction nous a permis d'étudier certaines adaptations comportementales négatives, et plus particulièrement le phénomène de contentement. Les dispositifs d'avertissements impliquant une coopération de type contrôle mutuel, quant à

eux, nous ont permis d'appréhender l'articulation entre les différents niveaux de traitement des informations délivrées par les dispositifs d'assistance et l'importance de la (des) modalité(s) sensorielle(s) mobilisée(s). Le simulateur de conduite a été choisi comme outil d'expérimentation, principalement parce qu'il offre un très bon contrôle expérimental, contrairement à la conduite sur véhicules réels. De plus, nos objectifs n'étaient pas centrés sur l'évaluation de dispositifs d'assistance avant leur mise en circulation sur le marché. Les études réalisées au cours de cette thèse constituent plutôt une étape dans une démarche de conception et d'évaluation des dispositifs d'assistance. Nous souhaitons aussi bien en évaluer l'efficacité qu'en comprendre le fonctionnement. Dans une perspective plus applicative, il conviendrait ensuite d'évaluer les dispositifs s'étant avérés les plus performants, en condition de conduite naturelle, sur de longues périodes et en mobilisant beaucoup de participants.

Dans la première partie expérimentale, un nouveau dispositif d'assistance (amorçage moteur) s'est révélé être plus efficace pour aider les conducteurs lors d'une situation de sortie de voie imminente que l'ensemble des autres dispositifs d'avertissement évalués. Les manœuvres de rétablissement vers une position sûre dans la voie ont donc été mieux réalisées en présence de l'assistance amorçage moteur. Les résultats indiquent une différence en termes de niveau d'intervention dans les processus de traitement de l'information, entre cette assistance et les autres dispositifs. L'amorçage moteur présente l'avantage d'agir directement au niveau de la réalisation de l'action, tandis que les autres dispositifs agissent uniquement au niveau du diagnostic de la situation. L'intervention de l'amorçage moteur directement sur l'organe effecteur à la fois du contrôle de la trajectoire du véhicule (le volant) et de l'exécution de la commande motrice par le conducteur (les mains) n'explique à lui seul que très marginalement l'amélioration observée des performances. De même, le fait que l'information soit délivrée au travers de la modalité haptique n'est pas en elle-même un facteur déterminant. C'est bien l'intervention directe au niveau moteur du dispositif qui est déterminante. Par ailleurs, le dispositif d'assistance amorçage moteur ne s'est pas révélé modifier le comportement des conducteurs lors de déclenchements non opportuns (passage sur la voie de gauche lors de contournement d'obstacles), ce qui suggère que la supervision de l'activité de conduite effectuée par le conducteur est capable d'adapter (en l'occurrence, d'inhiber) la réponse suggérée par le système. L'amorçage moteur apparaît donc être un bon candidat pour assister les conducteurs dans leur activité de guidage latéral. Les premiers résultats subjectifs recueillis indiquent cependant que, malgré son efficacité, ce dispositif n'est pas mieux accepté que les autres dispositifs d'avertissement aux sorties de voie. C'est même la tendance inverse qui est observée. Ceci illustre la dissociation pouvant exister entre l'effet d'un système sur les processus de contrôle de l'activité, d'une part, et l'évaluation que l'individu a de l'effet du système sur son activité, d'autre part. Les résultats laissent cependant penser que la combinaison de l'amorçage moteur avec une information plus

facilement reconnaissable, et donc mieux accepté, est en mesure d'endiguer cette tendance. Avant une utilisation commerciale, il conviendrait toutefois d'en étudier les effets sur de plus longues périodes de temps et sur un échantillon de population plus important et varié.

Pour les deux études constitutives de la première partie expérimentale, des situations de sorties de voie ont été générées au moyen d'une occlusion temporaire de la scène visuelle ou de la survenue d'une tâche secondaire détournant les conducteurs de leur activité de conduite. Cette méthode a été choisie car elle autorise une très bonne reproductibilité des situations critiques. L'expérimentateur détermine ainsi le lieu d'apparition des occlusions visuelles ou des tâches secondaires, puis modifie la trajectoire du véhicule à l'insu des conducteurs de sorte à provoquer une sortie de voie du côté désiré. Cette situation expérimentale se distingue de la situation de sortie de voie en conduite naturelle. En effet, les études portant sur l'accidentologie placent souvent la distraction et la somnolence comme les principales sources de sorties de voies (cf. cadre général, partie I.5.3), ce qui n'est pas le cas lors des sorties de voie provoquées dans nos études. Afin de contrôler la taille, le nombre, les endroits et les côtés de sortie de voie, les possibilités d'avoir recours à des conducteurs privés de sommeil ou victimes de troubles du sommeil (ex. : Paul, Boyle, Tippin & Rizzo, 2005) ou encore conduisant pendant de longues périodes de temps (ex. : Rossmeier et al., 2005) ont été écartées. Par voie de conséquence, plusieurs limitations liées aux situations critiques utilisées sont à prendre en considération. Premièrement, ces situations critiques sont provoquées alors que les conducteurs sont encore parfaitement en mesure de maintenir leur véhicule sur la voie de circulation. De plus, pendant l'occlusion de la scène visuelle ou l'apparition de la tâche secondaire, la trajectoire du véhicule est déviée. Le côté de sortie de voie alors généré peut être surprenant pour le conducteur compte tenu de la dynamique de son véhicule avant la situation critique (de par l'anticipation relative aux environnements dynamiques ; Cellier, 1996). Il est alors légitime de penser que la phase d'alerte, première étape du processus d'avertissement (Rogers, 2000), est considérablement amoindrie par la méthodologie expérimentale utilisée. Une perspective serait d'étendre nos explorations à des situations de sortie de voie induites naturellement de manière à confronter les dispositifs de type contrôle mutuel, et particulièrement l'amorçage moteur, à une plus grande variété de contextes de sorties de voie. Les limitations liées à la méthode expérimentale n'affectent toutefois pas la comparaison entre les assistances, chaque situation critique étant l'équivalente d'une autre. Dans l'absolu, les effets observés et leur taille pourraient, somme toute, être affectés par ces conditions d'évaluation particulières.

Dans la seconde partie expérimentale, la mise en situation d'invalidité d'un régulateur de position latérale a permis de confronter les conducteurs à la reprise en main du contrôle de leur véhicule. La délégation d'une partie de l'activité de guidage à un dispositif d'assistance correspond à une forme d'assistance déjà disponible sur certains véhicules actuellement en circulation. Les régulateurs de vitesse et d'inter-distance prennent ainsi en charge la gestion

de la vitesse du véhicule en fonction des instructions données par le conducteur et du trafic en présence. Certaines études ont indiqué l'apparition d'adaptations comportementales négatives en présence de la délégation du contrôle longitudinal du véhicule, avec particulièrement une augmentation du nombre de collisions lorsque le véhicule précédent freine brusquement (Stanton et al., 2001). Cette même étude fait également état d'une augmentation du nombre de collisions lors de la délégation du contrôle latéral. Le régulateur de position latérale est l'équivalent du régulateur de vitesse et d'inter-distance pour la dimension latérale du guidage et non plus la dimension longitudinale. Dans notre étude, le régulateur de position latérale s'est également révélé affecter l'activité de guidage des conducteurs dans son ensemble. Ainsi, des modifications des vitesses de conduite spontanées ont été recueillies. Des difficultés, lors de la reprise en main du contrôle latéral, ont également été observées. Ces adaptations comportementales négatives ont été rattachées au phénomène de contentement, qui résulte d'un désinvestissement des conducteurs de l'activité de conduite. Le désinvestissement porte particulièrement sur la fonction déléguée au dispositif d'assistance, mais pas seulement, ce qui soutient la théorie des ressources attentionnelles malléables proposée par Young & Stanton (2002). L'analyse des stratégies visuelles adoptées par les conducteurs n'a pas montré de négligence patente des informations visuelles utiles au maintien du contrôle latéral. Il semble toutefois que les conducteurs aient adopté des stratégies de prise d'informations plus anticipatives en présence de l'assistance. Cette adaptation apparaît être logique dans la mesure où les conducteurs n'avaient plus à gérer la position latérale de leur véhicule. Il est très probable qu'ils aient réorienté en partie leur prise d'information vers l'identification de risques (tels que le trafic) et du tracé de la route à venir, sans toutefois négliger les informations visuelles nécessaires à la prise de virages. Le phénomène de contentement s'est donc plutôt manifesté par une certaine difficulté à effectuer la correction de trajectoire en situation de reprise en main. Si les difficultés de reprise en main ont été décrites précisément, les modifications dans les stratégies oculaires observées mériteraient une attention plus détaillée. De futures études seront nécessaires afin de mieux qualifier les phénomènes psychologiques qui sous-tendent les modifications d'exploration de la scène visuelle observées. La compréhension de ces phénomènes est un préalable au développement de moyens pour contrer les adaptations comportementales négatives.

L'ensemble des travaux expérimentaux menés à travers l'accomplissement de ce travail doctoral présente l'originalité de se situer à l'articulation des niveaux de traitement de l'information symboliques et subsymboliques. Historiquement, le cadre de la coopération homme-machine s'est développé autour d'activités principalement symboliques telles que le pilotage d'avion (Hoc, 2000). Le pilotage moderne implique de nombreuses interférences entre le pilote et ses instruments de bord qui le renseignent sur l'état de l'appareil et sur l'état de l'environnement dans lequel il évolue. Certaines assistances au pilotage ne se contentent

pas de renseigner les conducteurs mais agissent sur le contrôle de l'appareil. Quoi qu'il en soit, la prise en considération des informations transmises par les instruments de bord constitue l'activité principale des pilotes. C'est en partie pourquoi une formation théorique conséquente est nécessaire avant d'entreprendre de piloter un avion. Après avoir très largement investi l'aviation, les dispositifs d'aide à l'activité se sont répandus dans le domaine de la conduite automobile au rythme des avancées techniques. A l'inverse du pilotage d'avion, et pour tout ce qui relève de l'activité de guidage, la conduite automobile repose en grande partie sur des habiletés perceptivo-motrices. Un nouveau champ d'étude relatif à la coopération homme-machine au cours d'une activité principalement subsymbolique s'est ainsi ouvert.

Au travers des études réalisées, des relations entre des phénomènes psychologiques induits par une situation coopérative particulière et les comportements perceptivo-moteurs responsables du bon déroulement de l'activité de guidage du véhicule ont été révélées. Ainsi, dans notre deuxième partie expérimentale, des adaptations comportementales négatives (rattachées au phénomène de contentement) ont été introduites avec la délégation du contrôle latéral. L'activité d'exploration de la scène visuelle, de nature subsymbolique, s'est donc trouvée affectée par des mécanismes symboliques tels qu'un désinvestissement de l'activité de conduite. Cette relation met en évidence l'influence des activités symboliques sur les activités subsymboliques. Les relations entretenues entre ces deux niveaux de contrôle ne sont pas unidirectionnels. En effet, dans la première partie expérimentale, des relations de sens inverse ont été observées. Le dispositif d'assistance nommé « amorçage moteur » est entré en interférence avec les conducteurs au niveau de la réalisation de l'action. Le signal délivré par cette assistance coopérative de type contrôle mutuel s'est donc mêlé aux boucles perceptivo-motrices avec succès. L'information d'avertissement a été directement adressée au niveau subsymbolique, grâce à un pré-indiçage moteur de l'action à entreprendre. Le diagnostic de la situation (traitement symbolique de la situation) était réalisé alors que l'exécution motrice était déjà en cours de réalisation. Non seulement l'initiation du traitement de nature symbolique n'est pas détériorée par l'action subsymbolique réalisée, mais au contraire, l'action guide le diagnostic de la situation. Cette possibilité d'agir au niveau subsymbolique offre donc la possibilité de rendre l'intervention d'une assistance plus efficace sans pour autant nuire à son traitement symbolique.

À deux reprises dans les travaux présentés, notre attention s'est portée sur les verbalisations des conducteurs, soit par le recueil des verbalisations spontanées, soit par l'intermédiaire d'entretiens. Il ressort de ces deux études que les conducteurs éprouvent des difficultés à formuler verbalement leurs activités de conduite. Très peu de verbalisations spontanées relatives à la coopération homme-machine ont été enregistrées. Même lors des entretiens, les conducteurs se sont révélés assez avars dans leurs descriptions verbales de la conduite. Ces difficultés renvoient à la nature subsymbolique de l'activité de guidage du véhicule. Les

activités perceptivo-motrices sont des activités fortement automatisées qui apparaissent plus difficiles à commenter verbalement que d'autres activités (telles que la prise de décision ou la résolution de problèmes). Au regard des quantités de verbalisations recueillies, il apparaît que pour déterminer avec précision l'acceptabilité de dispositifs d'aide au guidage du véhicule, un grand nombre de participants est très souhaitable. Un effectif de taille plus importante que celui mobilisé par nos études permettrait d'obtenir de plus nombreuses verbalisations, et par conséquent d'affirmer plus clairement les tendances émanant des résultats ainsi que la possibilité de les généraliser statistiquement. La nécessité d'un recours à un effectif de grande taille est accrue par caractère multidimensionnel de l'acceptabilité.

Les effectifs mobilisés dans nos études nous ont, en revanche, permis de rendre compte avec précision des comportements de conduite des individus, et plus particulièrement de l'incidence de dispositifs d'assistance sur certaines manœuvres de conduite. Au delà de l'activité de guidage prise dans sa globalité, deux situations de conduite spécifiques ont fait l'objet d'analyses détaillées. Il s'agit des manœuvres de rétablissement du véhicule lors de situations de sorties de voies imminentes et des manœuvres de contournement d'un obstacle situé sur la voie de circulation. Le faisceau de variables dépendantes utilisé pour décrire ces manœuvres a autorisé une analyse fine des comportements de conduite. En situation de sortie de voie, les conducteurs ont besoin d'un peu moins d'une demie seconde en moyenne pour initier une manœuvre correctrice. Les dispositifs d'assistance de type contrôle mutuel ont tendance à réduire légèrement ces temps de réponse. La vivacité du mouvement correctif, déterminée par les pics d'accélération au volant, est accrue jusqu'à plus de deux fois en fonction du dispositif d'assistance considéré. L'augmentation de la vivacité des réponses a résulté en une diminution des durées de sorties de voie allant jusqu'à près de 40 % pour les dispositifs amorçage moteur, sans toutefois induire de surcorrections lors du retour vers le centre de la voie. Cela témoigne donc d'une interférence positive de l'assistance vers le conducteur. Lors du contournement d'un obstacle positionné au centre de la voie de circulation, l'initiation des manœuvres d'évitement débute environ une seconde avant l'entrée en collision avec le véhicule à éviter. Ce temps est réduit d'un dixième en présence d'un dispositif de délégation de fonction. Cette réduction du temps de réponse s'accompagne de mouvements de volant plus amples, plus vifs et conduit à des écarts sur la voie de gauche plus importants avec l'assistance que sans. L'augmentation de la vivacité des mouvements de volant est donc cette fois le témoin d'une interférence négative de l'assistance vers le conducteur. Cette différence met en évidence la spécificité de chaque situation de conduite et souligne l'importance de faire appel à des variables multiples et complémentaires afin de décrire avec précision les manœuvres entreprises par les conducteurs. La finesse des analyses ainsi réalisées a été bénéfique pour caractériser avec précision les manœuvres de conduite.

Les dispositifs d'avertissement, de type contrôle mutuel, apparaissent comme les dispositifs privilégiés pour l'assistance au contrôle latéral et commencent à équiper les véhicules présents sur le marché. Des dispositifs d'assistance intervenant directement au niveau de l'action, tels que l'amorçage moteur pourraient faire leur apparition sur nos véhicules dans les années à venir. Ces dispositifs seront plus performants que les avertissements aux sorties de voie, tout en reposant sur le principe de contrôle mutuel du positionnement latéral du véhicule. À plus long terme, les régulateurs de position latérale offrent la possibilité d'optimiser la fluidité du trafic en minimisant l'espace latéral nécessaire à la circulation d'un véhicule. Toutefois, avant d'envisager une application sur des véhicules commercialisés, des études sont encore à mener, aussi bien au niveau de la conception du dispositif qu'au niveau de son impact sur les comportements des conducteurs. Ces remarques sont encore plus pertinentes lorsque le mode complètement automatisé est considéré. À mesure du développement des assistances à la conduite automobile et de l'augmentation de leur importance dans le guidage du véhicule, la question de la responsabilité juridique en cas d'accident se pose. La problématique de la responsabilité juridique et des assistances à la conduite fait d'ailleurs l'objet d'études spécifiques de plus en plus nombreuses (ex. : Bourgeois, Ehrich & Guilbot, 2007 ; Guilbot, 2008). Les constructeurs automobiles sont particulièrement soucieux des enjeux juridiques liés aux dispositifs d'assistance à la conduite surtout lorsque leur responsabilité peut être engagée en cas d'accident.

Par ailleurs, la multiplication des assistances au sein d'un même véhicule (ex. : système d'aide à la navigation embarquée, assistance au contrôle latéral, avertissement de dépassement de vitesse autorisée, etc.), soulève le problème de l'agrégation des différents signaux délivrés par ces assistances et de leur importance relative. Dans une logique d'intégration des différents dispositifs d'assistance, un système gérant la priorité des informations à transmettre semble incontournable. Amditis, Polychronopoulos, Andreone et Bekiaris (2006) ont ainsi imaginé un dispositif prenant en considération à la fois l'état du conducteur (via son niveau d'activité) et l'environnement routier (trafic et position du véhicule sur la route). Ce dispositif appelé COMUNICAR a pour fonction de présenter les bonnes informations, via la ou les bonnes modalités sensorielles, et au moment qui convient. Dans la continuité de cette idée d'adapter le plus efficacement possible l'assistance aux conditions dans lesquelles se trouvent les conducteurs, l'éventualité de séquencer les assistances en fonction de la criticité de la situation pourrait être développée. Lors de la survenue d'une situation de sortie de voie, l'assistance pourrait par exemple prendre consécutivement la forme d'un avertissement, d'un amorçage moteur, puis d'un mouvement de volant rectifiant automatiquement la trajectoire du véhicule. Un niveau d'assistance succéderait au précédent dans la mesure où ce dernier n'a pas entraîné les changements attendus.

Enfin, dans nos travaux les dispositifs d'assistance ont été étudiés avec un échantillon de conducteurs tout venant, mais assez peu âgés en moyenne et très majoritairement masculins. Il est envisageable que ces dispositifs influencent de manière différenciée des conducteurs aux caractéristiques différentes. Une perspective générale à nos trois expérimentations serait d'évaluer les répercussions des dispositifs d'assistance en fonction de la population de conducteurs concernés. En ce sens, les observations faites par Aberg et Rimmö (1998) tendent à indiquer que les conducteurs âgés pourraient être encore plus avantagés par la présence de dispositifs d'assistance, car les erreurs d'inattention augmentent avec l'âge. Des dispositifs d'avertissement par exemple, pourraient donc être particulièrement efficaces auprès de cette population de conducteurs.

RÉFÉRENCES

- A -

- Abe, G., & Richardson, J. (2006). Alarm timing, trust and driver expectation for forward collision warning systems. *Applied Ergonomics*, 37, 577–586.
- 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.
- Aga, M., & Okada, A. (2003). Analysis of vehicle stability control (VSC)'s effectiveness from accident data. *Proceedings of the 18th ESV Conference*, Nagoya.
- Aberg, L., & Rimmö, P. A. (1998). Dimensions of aberrant driver behaviour. *Ergonomics*, 41, 39-56.
- ADAC (2001). Verunglückte nach Unfallart. <http://www.adac.de>.
- Agent, K. R., Pigman, J. G., & Stamatiadis, N. (2001). *Countermeasures for Fatal Crashes on Two-lane Rural Roads* (Tech. Rep. KTC-01-25/KSP2-01-1F). Lexington, KY: University of Kentucky Transportation Center.
- Alm, H., & Nilsson, L. (1995). The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation. *Accident Analysis & Prevention*, 27, 707-715.
- Amditis, A., Polychronopoulos, A., Andreone, L., & Bekiaris, E. (2006). Communication and interaction strategies in automotive adaptive interfaces. *Cognition, Technology and Work*, 8, 193-199.

- B -

- Batavia, P. H. (1999). *Driver-adaptive lane departure warning systems*. PhD thesis, University pittsburgh, Pennsylvania, United States, September 1999. Thesis number CMU-RI-TR-99-25.
- Bahouth, G. (2005). Real World Crash Evaluation of Vehicle Stability Control (VSC) Technology. *49th annual proceedings, association for the advancement of automotive medicine*, USA, 19–34.
- Bar, F., & Page, Y. (2002). *Les sorties de voies involontaires*. Rueil-Malmaison, F : Ceasar, LAB.
- Becker, H., Busch, S., & Zobel, R., (2004). Methods for the evaluation of primary safety measures by means of accident research. *Proceedings of the FISITA World Automotive Congress*, Barcelona.

- Bengler, K. (1995). *Gestaltung und experimentelle Untersuchung unterschiedlicher Präsentationsformen von Wegleitungsinformation in Kraftfahrzeugen*. Thèse de doctorat, Université de Regensburg, Regensburg.
- Bertelson, P., & De Gelder, B. (2004). The psychology of multimodal perception. In C. Spence & J. Driver (Eds.), *Crossmodal space and crossmodal attention* (pp. 141-177). Oxford University Press, New York.
- Biester, L., & Bosch, R. (2005). The concept of cooperative automation in cars: results from experiment "overtaking on highways". *Proceedings of the third international driving symposium on human factors in driver assessment*.
- Blana, E., & Golias, J. (1999). *Behavioural validation of a fixed-base simulator*. Proceedings of the Driving Simulator Conference (DSC'99), Paris.
- Bliss, J. P., & Acton, S. A. (2003). Alarm mistrust in automobiles: how collision alarm reliability affects driving. *Applied Ergonomics*, 34, 499-509.
- Bliss, J. P., Fallon, C. K., & Nica, N. (2007). The role of alarm signal duration as a cue for alarm validity. *Applied ergonomics*, 38, 191-199.
- Boer, E. R. (1996). Tangent point oriented curve negotiation. *Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 7-12). Tokyo, Japan, Sept
- Bourgeois, G., Ehrich, J., & Guilbot, M. (2007, Juin). *Systèmes d'aide à la conduite et responsabilités juridiques. La situation en France. Application à l'exemple du LAVIA*. Papier présenté à la conférence e-safety, Berlin.
- Broughton, J., & Baughan, C. (2002). The effectiveness of antilock braking systems in reducing accidents in Great Britain. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 347-355.
- Brown, C. M. (2000). The concept of behavioural adaptation: Does it occur in response to lane departure warnings? *Proceedings of the International Conference on Traffic and Transport Psychology*. Berne, CH, September.
- Burns, P. C., & Wilde, G. J. S. (1995). Risk taking in male taxi drivers: Relationships among personality, observational data, and driver records. *Personality and Individual Differences*, 18, 267-278.

- C -

- Cairda, J. K., Willness, C. R., Steel, P., & Scialfa, C. (sous presse). A meta-analysis of the effects of cell phones on driver performance. *Accident Analysis & Prevention*.
- Cahour, B. (2006) L'expérience vécue des utilisateurs : pourquoi l'étudier et comment ? *Actes du colloque CITE 2006 (Coopération, Innovation, Technologie), Semaine de la connaissance, Nantes 26-30 juin*.
- Camus, J. F. (1996). *La psychologie cognitive de l'attention*. Paris : Armand Collin-Masson.

- Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence* 103, 157–182.
- Cellier, J. M. (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In J. M. Cellier, V. de Keyser, & C. Valot (Eds.), *La gestion du temps dans les environnements dynamiques* (pp. 19-48). Paris : PUF.
- Chaib, S., Netto, M., & Mammar, S. (2004). Hinfinité, adaptative, PID and fuzzy control: A comparison of controllers for vehicle's lane keeping. *Paper presented at the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Parma, Italy, June.*
- Chapon, A., Gabaude, C., & Fort, A. (2006). *Défauts d'attention et conduite automobile*. Synthèse n° 52, Les collections de l'INRETS.
- Chapanis, A. (1996). *Human Factors in Engineering*. New York: Wiley.
- Chattington, M., Wilson, M., Ashford, D., & Marple-Horvat, D. E. (2007). Eye-steering coordination in natural driving. *Experimental Brain Research*, 180, 1-14.
- Chan, A. H. S., & Chan, K. W. L. (2006). Synchronous and asynchronous presentation of auditory and visual signal: Implication for control console design. *Applied ergonomics*, 37, 131-140.
- Chang, T. H. (1996a). Vehicle lateral control modeling for steering automation in the ADVANCE-F system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 18, 149–159.
- Chang, T. H. (1996b). Initial control algorithm for switching-in and switching-out an automatic steering system: ADVANCE-F. *Proceedings of the 3rd World Congress on ITS, ITS America.*
- Chang, T. H. (2004). Field performance assessment of the ADVANCE-F automatic steering control vehicle. *Control Engineering Practice*, 12, 569-576.
- Citroën site internet. Lane departures warning systems. Janvier 29, 2008, depuis <http://www.citroen.com/CWW/en-US/TECHNOLOGIES/SECURITY/AFIL/>
- Clarke A. H, Clarke M. C., & Scherer H. (1996). The influence of vestibular disorder on driving behaviour. In: Gale A.G. , Brown I. D. , Haslegrave C. M. , Taylor S. P. (Eds.), *Vision in vehicles, vol. V* (pp. 41–48). Elsevier, Amsterdam.
- Colavita, B. A. (1974). Human sensory dominance. *Perception and Psychophysics*, 16, 409–412.
- Comte, S., Warman, M., & Whelan, G. (2000). Drivers' acceptance of automatic speed limiters: implications for policy and implementation. *Transport Policy*, 7, 259-267.

- D -

- Dang, J. N. (2004). *Preliminary results analysing the effectiveness of of electronic stability control (ESC) systems*. (Tech. Rep. DOT HS 809 790). United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.
- De Jong, P. T. V. M., De Jong, V. J. M. B., Cohen, L., & Jongkees, L. B. W. (1977). Ataxia and nystagmus induced by injection of local anesthetics in the neck. *Annals of neurology*, 1, 240-246.
- Deatherage, B. H. (1972). Auditory and other sensory forms of information processing. In H. P. Van Cott & R. G. Kincade (Eds.), *Human engineering guide to equipment design* (pp. 123-160). Washington, DC: American Institutes for Research.
- Desmond, P. A., Hancock, P. A., & Monette, J. L. (1998). Fatigue and automation-induced impairments in simulated driving performance. *Transportation Research Record*, 1628, 8-14.
- Dingus, T. A., Hulse, M. C., McGehee, D. V., & Manakkal, R. (1994). Driver performance results from the Travtek IVHS camera car evaluation study. *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors & Ergonomics Society* (pp. 1118-1122). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behaviour. *Human Factors*, 20, 691-707.

- E -

- El Hajjaji, A., & Bentalba, S. (2003). Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 43, 203-213.
- 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.
- Espié, S. (1999). Vehicle-driven simulator versus traffic-driven simulator: the INRETS approach [proceedings on CD-Rom]. *Proceedings of the Europe Driving Simulation Conference, Paris : France*.
- Espié S., Mohellebi H., & Kheddar A. (2003). A high performance / low-cost mini driving simulator alternative for human factor studies. *Proceedings of the Europe Driving Simulation Conference Paris : France*.
- Essma, S. (2000). Steering Effort Analysis of an Oval Racing Track Setup Champ Car. Paper presented at the 2000 International ADAMS User Conference, June 19-21, Orlando, Florida.

European Commission (2005). *Cost-benefit assessment and prioritisation of vehicle safety technologies*. European Commission Directorate General Energy and Transport, Interim report October 2005.

- F -

Fagerberg, K. (2004). Vehicle-based detection of inattentive driving for integration in an adaptative lane departure warning system – drowsiness detection. *Master of Science thesis, Stockholm, Sweden, March 2004. Master thesis IR-SB-EX-0413.*

Farmer C. (2001) New evidence concerning fatal crashes of passenger vehicles before and after adding antilock braking systems, *Accident Analysis and Prevention*, 33, 361–369.

Farmer, C. M. (2004). Effect of Electronic Stability Control on Automobile Crash Risk. *Traffic Injury Prevention*, 5, 317–325.

Farmer, C. M. (2006). Effects of electronic stability control: An update. *Traffic Injury Prevention* 7, 319–324.

Flavell, J. (1979). Metacognition and cognitive monitoring: Anew area of cognitive-developmental inquiry. *American Psychologist*, 34, 906-911.

Federal hightway administartion. Available at http://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/rumble/rumble_types/types_mill.htm. Accessed April 25, 2008.

Fuchs, P., Moreau, G., & Papin, J. P. (2001). *Traité de la réalité virtuelle*. Paris: Presses de l'École des Mines.

Frides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: cross-modal functions, information complexity, memory and deficit. *Psychological Bulletin*, 81, 284-435.

- G -

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

Gouin, V., Cherrier, G., & Touvenot, G. (2003). *Définition et évaluation des pré-concepts d'IHM* (Rapport de recherche ARCOS). Université technologique de Belfort-Montbéliard, Belfort, France.

Grandjean, E. (1986). *Fitting the task to the man: An ergonomic approach*. (London: Taylor & Francis).

Green, P. (1998). *Visual and Task Demands of Driver Information Systems* (Tech. Rep. UMTRI-98-16), Ann Arbor, MI: University of Michigan Transportation Research Institute.

Green, P. E., & Woodrooffe, J. (2006). The estimated reduction in the odds of loss-of-control type crashes for sport utility vehicles equipped with electronic stability control. *Journal of Safety Research*, 37, 493-499.

- Green T. R. G., & Hoc, J. M. (1991). What is cognitive ergonomics? *Le travail Humain*, 54, 291-304.
- Griffiths, P., & Gillespie, R. B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human Factors*, 47(3), 574-590.
- Guilbot, M. (2008, Janvier). *Assistances à la conduite et responsabilités juridiques (à propos du droit français)*. Papier présenté au colloque Prédit sécurité routière et gestion du trafic, Strasbourg.

- H -

- Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2000). *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, Paris, PUF.
- Hershenson, M. (1962) Reaction time as a measure of intersensory facilitation. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 289-293
- Helleberg, J. , Wickens, C.D, & Goh, J. (2003). Traffic and data link displays: auditory? visual? or redundant? a visual scanning analysis. *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology*, Dayton, OH.
- Hjälmdahl, M., & Varhelyi, A. (2004). Speed regulation by in-car active accelerator pedal, effects on driver behaviour. *Transportation Research Part F*, 7, 77-94.
- Ho, C., & Spence, C. (2005). Assessing the effectiveness of various auditory cues in capturing a driver's visual attention. *Journal of experimental psychology*, 11, 157-174.
- Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2005). Using spatial vibro-tactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research - Part F*, 8, 397-412.
- Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2006). Assessing the effectiveness of "intuitive" vibrotactile warning signals in preventing front-to-rear-end collisions in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 38, 989-997.
- Hoc, J. M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Grenoble : Presse Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J. M. (1999). Conditions et enjeux de la coopération homme-machine dans le cadre de la fiabilité des systèmes. In J. G. Ganascia (Eds.), *Sécurité et cognition* (pp. 147-164). Paris: Hermès.
- Hoc, J. M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.
- Hoc, J. M. (2001a). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.

- Hoc, J. M. (2001b). Toward ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2, 278-288.
- Hoc, J. M. (2003). Coopération et systèmes coopératifs. In G. Boy (Ed.), *Ingénierie cognitive. IHM et cognition* (pp. 139-187). Paris: Hermès.
- Hoc, J. M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 22-55.
- Hoc, J. M., & Blosseville, J. M. (2003). Cooperation between drivers and in-car automatic driving assistance. In G.C. van der Veer & J.F. Hoorn (Eds.), *Proceedings of CSAPC'03* (pp. 17-22), Roquencourt, France: EACE.
- Hoc, J. M., Cacciabue, P. C., & Hollnagel, E. (1995). Expertise and technology. Cognition & human-computer cooperation. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Hoc, J. M., Young, M., & Blosseville, J. M. (sous presse). Cooperation between drivers and automation: implication for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*.
- Hoc, J. M., Mars, F., Milleville, Jolly, E., Netto, M., & Blosseville, J. M. (2006). Evaluation of human-machine cooperation modes in car driving for safe lateral control in curves: delegation and mutual control modes. *Le Travail Humain*, 69, 155-185.
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1, 95-106.
- Hollnagel, E. (2006). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design. *Cognition, Technology and Work*, 8, 169-173.
- Horrey, W. J., Wickens, C.D., & Consalus, K.P. (2006). Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12, 67-78.
- Horswill, M. S., & McKenna, F. P. (1999). The development, validation, and application of a video based technique for measuring an everyday risk-taking behaviour: Drivers' speed choice. *Journal for Applied Psychology*, 6, 977-985.

- I -

International ergonomics association (IEA). 2008. www.iea.cc

Ito, H., Uno, H., Atsumi, B., & Akamatsu, M. (2001). Visual distraction while driving: Trends in research and standardisation. *IATSS Research*, 25, 20-28.

- J -

- K -

- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131.
- Kahane C. (1994) Preliminary evaluation of the effectiveness of antilock brake systems for passenger cars. Report no. DOT- HS-808-206. U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Kaptein, N. A., Theeuwes, J., & Van der Horst, R. (1996). Driving simulator validity, some considerations. *Transportation Research Record*, 1550, 30-36.
- Karwowski, W. (2001), *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. London: Taylor & Francis.
- Karwowski, W. (2005). Ergonomics and human factors: the paradigms for science, engineering, design, technology and management of human-compatible systems. *Ergonomics*, 48, 436-463.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving in driving simulation experiments. *Trends in cognitive sciences*, 7, 31-37.
- Kovordányi, R., Ohlsson, K., & Alm, T. (2005). Dynamically deployed support as a potential solution to negative behavioral adaptation. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium sponsored by the IEEE Intelligent Transportation Systems Society* (pp. 613–618). Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Kozak, K., Pohl, J., Birk, W., Greenberg, J., Artz, B., Blommer, M., Cathey, L., & Curry, R. (2006). Evaluation of lane departure warnings for drowsy drivers. *Proceedings of the human factors and ergonomics society 50th annual meeting*, 2400-2404.
- Kreiss, J.-P., Schüler, L., & Langwieder, K. (2006). The effectiveness of primary safety features in passenger cars in Germany. ESV-paper No. 05-0145. *Proceedings of the 19th- ESV-Conference*, Washington D.C.

- L -

- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369, 742-744.
- LeBlanc, D., Sayer, J., Winkler, C., Ervin, R., Bogard, S., Devonshire, J., Mellford, M., Hagan, M., Goodsell, R., & Gordon, T. (2006). *Road departure crash warning system field operational test: Methodology and results*. (Tech. Rep. UMRTI-2006-9-1), United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.

- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (1992). *Programme d'Analyse des Comparaisons (PAC)*. Saint-Mandé, France: CISIA.
- Lee, J. D., Caven, B., Haake, S., & Brown, T. L. (2001). Speech-based interaction with in-vehicle computers: The effect of speech-based e-mail on drivers' attention on the roadway. *Human Factors*, 43, 631-640.
- 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, 314-334.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46, 50-80.
- Lefevre, R., Bordel, S., Guingouain, G., Pichot, N., Somat, A., & Teste, B. (2004). La mesure de l'acceptabilité sociale d'un produit technologique : l'exemple des dispositifs d'aide à la conduite : Nouvelles Technologies, Sécurité et Exploitations Routières. *Revue Générales des Routes et des Aéroports*, 832, 27-32
- Lie, A., Tingall, C., Krafft, M., & Kullgren, A. (2004). The effectiveness of ESP (electronic stability program) in reducing real life accidents. *Traffic injury prevention*, 5, 37-41.
- Liu, Y. C. (2001). Comparative study of the effects of auditory, visual, and multimodality displays on drivers' performance in advanced traveler information systems. *Ergonomics*, 44(4), 425-442.
- M -**
- McKeown, D., & Isherwood, S. (2007). Mapping candidate within-vehicle auditory displays to their referents. *Human Factors*, 3, 417-428.
- Mackworth, N. H. (1950). Researches in the measurement of human performance. MRC special report series n° 268, H. M. stationary office, London.
- Malaterre, G., & Saad, F. (1986). Les aides à la conduite : définitions et évaluation. Exemple du radar anticollision. *Le Travail Humain*, 49, 333-346.
- Mars F. (2006). Driving in curves with constrained gaze orientation in the vicinity of the tangent point. *Proceedings of the 11th International Conference on Vision In Vehicles (VIV11)*.
- Mars F. (2008a). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, sous presse.
- Mars F. (2008b). Steering and gaze control modifications from directed or spontaneous use of a visual augmentation cue. *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES 2008)*, 5 pp.
- Matthews, M. L., & Cousins, L. R. (1980). The influence of vehicle type on the estimation of velocity while driving. *Ergonomics*, 23, 1151-1160.

- McLane, R. C., & Wierwille, W. W. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. *Human Factors*, 17, 488-501.
- McRuer, D. T., Allen, R. W., Weir, D. H., & Klein, R. H. (1977). New results in driver steering control. *Human Factors*, 19, 381-397.
- Memmer, S. (2001) Stability control: Get your yaw-yaws out! (May 2).Edmunds.com, Inc., SantaMonica, CA. Available at <http://www.edmunds.com/ownership/safety/articles/45992/article.html>. Accessed August 31, 2004.
- Mestre, D. R. (2004). Activité sensori-motrices : apports de la réalité virtuelle à la psychologie ergonomique. In J. M. Hoc & F. Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (pp. 201-220). Paris : Presses Universitaires de France.
- Mestre, D. R., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2005). Gaze behavior during simulated driving: elements for a visual driving aid. *Proceedings of the 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design (Driving Assessment 2005)*. Iowa City: University of Iowa Public Policy Center, 304-310.
- Mestre, D. R., Mars, F., Durand, S., Vienne, F., & Espié, S. (2004) A visual aid for curve driving. *Proceedings of the 8th Driving Simulation Conference (DSC Europe 2004)*. Paris : INRETS-RENAULT, 311-320.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models. What do we know, what should we do? In L. Evans & R. Schwing (Eds.), *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-525). Plenum press, New York.
- Milleville-Pennel, I., & Mahè, A. (2006). Visual anticipation of road departure [résumé]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Enactive Interfaces* (pp. 181-182), Montpellier, France.
- Millot, P. (1988). Supervision des procédés automatisés et ergonomie. Paris : Hermès.
- Mollenhauer, M. A., Hulse, M. C., Dingus, T. A., Jahns, S. K., & Carney, C. (1997). *Design decision aids and human factors guidelines for ATIS displays*. In Y. I. Noy (Eds.), *Ergonomics and safety of intelligent driver interfaces* (pp. 23-61). Mahwah, NJ:Erlbaum.
- Montiglio, M., Martini, S., & Murdocco, V. (2006) Development of lane keeping support system for heavy-trucks. *Proceedings of the ITS world congress, 2006, London*.
- Moray, N. (2003). Monitoring, complacency, scepticism and eutactic behaviour. *Industrial Ergonomics*, 31, 175-178.
- Morena, D. A. (2003). The nature and severity of drift-off road crashes on Michigan freeways, and the effectiveness of various shoulder rumble strip designs. *Proceedings of the TRB 2003 Annual Meeting, 2003*, 1-23.

- Moriwaki, K. (2005). Autonomous steering control for electric vehicles using nonlinear state feedback H[infinity] control. *Nonlinear Analysis*, 63, 2257-2268.
- Mosedale, J., Purdy, A., & Clarkson, E. (2004). *Contributory factors to road accidents. Transport statistics: Road Safety Department for Transport*. London: HMSO.
- Muir, B. M. (1994). Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, 37, 1905-1922.

- N -

- Najm, W. G., Koopmann, J., Boyle, L., & Smith, D. (2002). *Development of Test Scenarios for Off-Roadway Crash Countermeasures Based on Crash Statistics*. (Tech. Rep. DOT-HS-809 505), United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.
- 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.
- National Highway Traffic Safety Administration, 2003. *Fatality Analysis Reporting System*. U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Netto, M. S., Labayrade, R., Ieng S. S., Lusetti, B., Blosseville, J. M., & Mammar, S. (2003, November). *Different Modes on Shared Lateral Control*. Paper presented at the 10th ITS World Congress, Madrid, Spain.
- Niibe, T., Isomoto, K., Suetomi, T., & Butsuen, T. (1995) Development of a lane keeping system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 16, 3, 323.
- Nilsson, L. (1993). Simulator studies and driver behaviour. Dans A. M. Parkes & S. Franzen (Eds.), *Driving Future Vehicles* (pp. 401-407). London: Taylor & Francis.
- Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise controls in critical traffic situations. *Proceedings 2nd World Congress Intelligent Transport Systems* (pp. 1254-1259). Tokyo: VERTIS.

- O -

- OECD (1990). *Behavioural Adaptations to changes in the road transport system*. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.

- P -

- Page, Y., & Cuny, S. (2006). Is electronic stability program effective on French roads? *Accident analysis & Prevention*, 38, 357-364.
- Page, N. G. R., & Gresty, M. A. (1985). Motorist's vestibular disorientation syndrome. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 48, 729-735.

- Papelis, Y., Brown, T., Watson, G., Holtz, D., & Pan, W. (2004). *Study of ESC assisted driver performance using a driving simulator* (Tech. Rep. N04-003-PR). University of Iowa, Iowa City, IA.
- Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43, 931–951.
- Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced “complacency”. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3, 1-23.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39, 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286–297.
- Parkes, A. M. (1993). Voice communication in vehicles. In A. M. Parkes & S. Franzen (Eds.), *Driving future vehicles* (pp.219-228). Philadelphia: Taylor & Francis.
- Paul, A., Boyle, L., Tippin, J., & Rizzo, M. (2005). Variability of driving performance during microsleep. *Proceedings of the International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, USA*, 18-24.
- Persaud, B. N., Retting, R. A., & Lyon, C. (2003). Crash reduction following installation of centerline rumble strips on rural two-lane roads. *Insurance institute for highway safety, Arlington, VA*.
- Piaget, J. (1977). *Études sociologiques* (3^e éd). Genève: Droz.
- Pohl, J., & Ekmark, J. (2003). Development of haptic intervention system for unintended lane departure. *SAE transactions*, 112, 7, 243-247.
- Posner, M., & Boies, S. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, 78, 391-408
- Posner, M. (1975). Psychobiology of attention. In M. Gazzaniga & C. Blakemore (Eds.), *Handbook of Psychobiology* (pp. 441-480). Academic Press, New York.

- Q -

- R -

- Rach, S., & Diederich, A. (2006). Visual–tactile integration: does stimulus duration influence the relative amount of response enhancement? *Experimental Brain Research* 173, 514–520.
- Racicot, B. M., & Wogalter, M. S. (1995). Effects of a video warning sign and social modeling on behavioral compliance. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 57 – 64.

- Rajaonah, B., Anceaux, F., Espié, S., & Hoc, J.M. (2003). A study of the link between trust and use of adaptive cruise control. In G.C. van der Veer & J.F. Hoorn (Eds.), *Proceedings of CSAPC'03* (pp. 29-35). Rocquencourt, France : EACE.
- Räsänen, M. (2005). Effects of rumble strip barrier line on lane keeping in a curve. *Accident analysis and prevention*, 37, 575-581.
- Ranney, T., Mazzae, E., Garrott, R., & Goodman, M. J. (2000). *Driver distraction research: past, present and future*. National Highway Transportation Safety Administration, Driver distraction internet forum.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules and knowledge: Signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC-13)*, 257-266.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Reason, J. (1993). L'erreur humaine (J. M. Hoc). Paris : Presses Universitaires de France. (ouvrage original paru en 1990).
- Rimini-Döring, M., Altmueller, T., Ladstaetter, U., & Rossmeier, M. (2005). Effects of lane departure warning on drowsy drivers' performance and state in a simulator. *Proceedings of the International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, USA*, 88-95.
- Révész, G. (1934). System der optischen und haptischen Raumtäuschungen. *Zeitschrift für Physiologie*, 131, 296-375.
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez J., & Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on real vehicle and driving simulator. *Human Factors*, 43, 483-495.
- Rock, I., & Harris, C. S. (1967). Vision and touch. *Scientific American*, 216, 96-104.
- Rogers, W. A., Lamson, N., & Rousseau, G. K. (2000). Warning research: an integrative perspective. *Human factors*, 42, 102-139.
- Rossmeier, M., Grabsch, H., & Rimini-Döring, M. (2005). Blind flight: Do auditory lane departure warnings attract attention or actually guide action? *Proceedings of ICAD 05- Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display, Limerick, Ireland, July 6-9, 2005*
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149-158.
- Royal, D. (2003). National Survey of Distracted and Drowsy Driving. United states: The Gallup Organisation et NHTSA.

- Rudin-Brown, C. M., & Noy, Y. I. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record*, 1803, 30–37.
- Rudin-Brown, C. M., & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): Implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(2), 59-76.
- Rumar, K. (1985). The role of perceptual and cognitive filters in observed behaviour. In L. Evans and R. C. Schwing (Eds.), *Human Behaviour and Traffic Safety* (pp. 151-165). Plenum Press, New York.

- S -

- Saad, F., & Villame, T. (1999). Intégration d'un nouveau système d'assistance dans l'activité des conducteurs d'automobile. In J.G. Ganascia (Eds.), *Sécurité et cognition* (pp. 105-114). Paris : Hermès.
- Salas, E., Prince, C., Baker, D. P., & Shrestha, L. (1995). Situation awareness in team performance: implications for measurements and training, *Human Factors*, 37, 123-136.
- Salvucci, D. D., & Gray, R. (2004). A two-point visual control model of steering. *Perception*, 33, 1233-1248.
- Sayer, B. T., Sayer, J. R., & Devonshire, J. M. (2005). Assessment of a driver interface for lateral drift and curve speed warning systems: mixed results for auditory and haptic warnings. *Proceedings of the International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, USA, 218-224.
- Selcon, S. J., Taylor, R. M., & McKenna, F. P. (1995). Integrating multiple information sources: using redundancy in the design of warnings. *Ergonomics*, 38, 2362–2370.
- Sferco, R., Page, Y., Lecoq, J. Y., & Fay, P. A. S. (2001). Potential effectiveness of electronic stability programs (ESP) what European field studies tell us. *Proceedings of the 17th international technical conference on the enhanced safety of vehicles*, Amsterdam.
- Sheridan, T. B. (1980). Computer control and human alienation. *Technology Review (October)*, 61–73.
- Sheridan, T. B., & Hennessy, R. T. (1984). Research and modeling of supervisory control behavior. Washington: National Academy Press.
- Sheridan, T. B. & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Cambridge, MA: MIT Man-Machine Systems Laboratory Report.
- Shimakage, M., Satoh, S., Uenuma, K., & Mouri, H. (2002). Design of lane keeping control with steering torque input. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 23 (3), 317-323.
- Shinar, D. (1978). *Psychology of the road: The human factor in traffic safety*. New York: Wiley.

- Simon, J. H. (2005). Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems. *Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill*. PhD thesis, University Chemnitz, Munich, Germany, April 2005. Disponible le 04 Juillet 2008, depuis archiv.tu-chemnitz.de/pub/2006/0071/data/Dissertation_Simon.pdf
- Srinivasan, R., Yang, C., Jovanis, P., Kitamura, R., & Anwar, M. (1994). Simulation study of driving performance with selected route guidance systems. *Transportation Research, 2C(2)*, 73-90.
- Sklar, A. E., & Starter, N. B. (1999). Good Vibrations: Tactile Feedback in Support of Attention Allocation and Human-Automation Coordination in Event-Driven Domains. *Human factors, 41*, 543-552.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. (1998). Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics, 41*, 1014-1028.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. (2000). A proposed psychological model of driving automation. *Theoretical Issues In Ergonomic Sciences, 4*, 315-331.
- Stanton, N. A., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, A., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics, 5*, 221-236.
- Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., & Hendrick, H. W. (2004). *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*. Boca Raton: CRC Press.
- Steele, M., & Gillespie, B. (2001) Shared control between human and machine: using a haptic steering wheel to aid land vehicle guidance. *Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting, Minneapolis, MN, October 2001*.
- Steinfeld, A., & Tan, H.S. (2000). Development of a driver assist interface for snowplows using iterative design. *Transportation human factors, 2*, 247-264.
- Stevens, A., & Minton, R. (2001). In-vehicle distraction and fatal accidents in England and Wales. *Accident Analysis and Prevention, 33*. 539-545.
- Stutts, J. C., Feaganes, J., Reinfurt, D. W., Rodgman E. A., Hamlett, C., Gish, K., & Staplin, L. (2005). Driver's exposure to distractions in their natural driving environment. *Accident Analysis & Prevention, 37*, 1093-1101.
- Stutts, J. C., Feaganes, J., Rodgman E. A., Hamlett, C., Meadows, T., Reinfurt, D. W., Gish, K., Mercadante, M., & Staplin, L. (2003). *Distraction in everyday driving*. Report prepared for AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.
- Stutts, J. C., Reinfurt, D. W., Staplin, L., & Rodgman, E. A. (2001). *The role of driver distraction in traffic crashes*. Report prepared for AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC.

- Subramanian, R. (2005). *Motor vehicle traffic crashes as a leading cause of death in the United States, 2002*. (Tech. Rep. DOT HS 809 831). United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors*, 38(3), 442-451.
- Suzuki, K., & Jansson, H. (2003). An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 24, 65-70.
- Swedish Institute for Transport and Communications Analysis (SIKA), *Road Traffic Injuries 2001*. Stockholm, 2001.

- T -

- Tanida, K. (2000). Reducing the effects of driving fatigue with the adoption of a lane following assistance system. *Japan Society of Automotive Engineers Review*, 21, 258-260.
- de Terssac, G. & Chabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. In J. Leplat, G. de Terssac (Eds.), *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes* (pp.110-139). Octarès, Toulouse.
- Thomas, P. (2006). Crash involvement risks of cars with electronic stability control systems in Great Britain. *International Journal of Vehicle Safety* 1, 267-281.
- Tijernia, L. (1999). Operational and bevarioral issues in the comprehensive evaluation of lane change crash avoidance systems. *Transportation human factors*, 1(2), 159-175.
- Tijernia, L., Geckler, M., Stoltzfus, D., Johnson, S., Goodman, M., & Wierwille, W. (1999). *A Preliminary Assessment of Algorithms for Drowsy and Inattentive Driver Detection on the Road*, National Highway Traffic Safety Administration.
- Tijernia, L., Jackson, J. L, Pomerleau, D. A, Romano, R. A, & Petersen, A. D. (1995). *Run-off-road collision avoidance countermeasures using IVHS coutermeasures*. (Tech. Rep. DOT HS 808 502). United-States, National Highway Transportation Safety Administration Research.
- 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.
- Tingvall, C., Krafft, M., Kullgren, A., & Lie, A., (2003). The effectiveness of ESP (electronic stability programme) in reducing real life accidents. *Proceedings of the 18th ESV Conference*, Nagoya.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2003). Influence of steering wheel torque feedback in a dynamic driving simulator. *Paper presented at the DSC North America Proceedings*, October 8-10, Dearborn, Michigan.

- U -

Unsel, T., Breuer, J., Eckstein, L., & Frank, P., 2004. Avoidance of “loss of control accidents” through the benefit of ESP. *Proceedings of the 30th FISITA World Automotive Congress*, Barcelona.

- V -

- Van Erp, J. B. F., Veltman, J. A., Van Veen, H. A. H. C., & Oving, A. B. (2003). Tactile torso display as countermeasure to reduce night vision goggles induced drift. *Proceedings of the RTO meeting 86*, Neuilly-sur-Seine Cedex, France, 49-1 - 49-8.
- Van Erp, J. B. F., Veltman, J. A., & Van Veen, H. A. H. C. (2003). A tactile cockpit instrument to support altitude control. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting*, pp. 114-118.
- Van Erp, J. B. F. & Van Veen, H. A. H. C. (2004). Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Research - Part F*, 7, 247-256.
- Van Erp, J. B. F. (2005). Presenting direction with a vibro-tactile torso display. *Ergonomics*, 48, 302-313.
- Van Erp, J. B. F., Van Veen, H. A. H. C., Saturday, I., Jansen, P. J. Werkhoven, P. J. (2006) Vibrotactile displays: spin-off from challenging environments to sport. *Proceedings of the 16th World Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2006)*, Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 0886, (CD-ROM)
- Van Winsum, W., & Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors*, 38, 434-441.
- Van Zanten, A. T. (2000). Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience, SAE 2000-01-1633.
- Van Zanten, A. T. (2002, août). *Evolution of electronic control systems for improving the vehicle dynamic behavior*. Paper presented at the 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Taipei, Taiwan.
- Vanderhaegen, F., Chalmé, S., Anceaux, F., & Millot, P. (2006). Principles of cooperation and competition: application to car driver behavior analysis. *Cognition, Technology & Work*, 8, 183-192.
- Várhelyi, A., Hjälm Dahl, M., Hydén, C., & Draskóczy, M. (2004). Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 729-737.
- Vermersch, P. (1994). *L'entretien d'explicitation*. ESF, Paris.
- Vicente, K.J. (2002). Ecological Interface Design: Progress and challenges. *Human Factors*, 44, 62-78.
- Vicente, K. J. (2004). *The Human Factor*. New York: Routledge.

Villame, T. (2004). Conception de systèmes d'assistance au conducteur : comment prendre en compte le caractère complexe, dynamique et situé de la conduite automobile ? Cognition située et conception de systèmes d'assistance au conducteur, *@ctivités*, 1 (2), 146-169. <http://www.activites.org/v1n2/villame.pdf>

- W -

Wang, J. S., Knipling, R. R., & Goodman, M. J. (1996). The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 crashworthiness data system. *Proceedings of the Advancement of Automotive Medicine 40th Annual Meeting*, pp. 377-392.

Wang, D. Y. D., Proctor, R. W., & Pick, D. F. (2003). The simon effect with wheel-rotation responses. *Journal of motor behavior*, 25 (3), 261-273.

Ward, N. J., Alexander, L., Chend, P. M., Gorjestani, A., Newstrom, B., Olson, C., Shankwitz, C., Trach, W., & Donath, M. (2004). A demonstration of a vision enhancement system for state patrol vehicles. *Intelligent Transportation Systems*, 8, 169-185.

Ward, N. J., Fairclough, S. H., & Humphreys, M. (1995). The effect of task automation in the automotive context: a field study of an autonomous intelligent cruise control system. *Paper presented at the International Conference on Experimental Analysis and Measurement of Situation Awareness*, Daytona Beach, FL, November.

Wiener, E.L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar* (pp. 116-125). Denver, CO: Flight Safety Foundation, Inc.

Wiener, E., Kanki, B., & Helmreich, R. (Eds.). (1993). *Cockpit Resource Management*. New York: Academic Press.

Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & R. Davies (Eds.), *Varieties of attention* (pp.63–101). New York: Academic.

Wickens, C. D. (1992). *Engineering psychology and human performance* (2nd ed.). New York: HarperCollins.

Wickens, C.D., Goh, J., Helleburg, J., Horrey W.J., & Talleur, D.A. (2003). Attentional models of multi-task pilot performance using advanced display technology. *Human Factors*, 45, 360-380.

Wickens, C. D., & Gosney, J. L. (2003). *Redundancy, modality, priority and instructions in dual task interference between simulated vehicle control and in-vehicle technology* (Tech. Rep. AHFD-03-18/GM-03-3). Savoy, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, Aviation Research Lab.

- Wickens, C. D., & Hollands, J.G., (2000). Introduction to engineering psychology and human performance. In Wickens, C.D., Hollands, J.G. (Eds.), *Engineering Psychology and Human Performance* (1-14). Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Wickens, C. D., & Seppelt, B. (2002). *Interference with driving or in-vehicle task information: The effects of auditory versus visual delivery* (Tech. Rep. AHFD-02-18/GM-02-03). Savoy, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign, Aviation Human Factors Division.
- Wilde, G. J. S. (1982). Critical issues in risk homeostasis theory. *Risk Analysis*, 2, 349-258.
- Wilson, M., Stephenson, S., Chattington, M., & Marple-Horvat, D. E. (2007). Eye movements coordinated with steering benefit performance even when vision is denied. *Experimental Brain Research*, 176, 397-412.

- X -

- Y -

- Yamamoto, A, & Kimura, Y. (1996) Influence of ABS on rollover accidents. Paper no. 96-S5-O-04. *Proceedings of the 15th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
- Young, K. L., & Regan, M. A. (2007). Use of manual speed alerting and cruise control devices by car drivers. *Safety Science*, 45, 473-485.
- Young, K. L. , Regan, M. A., & Hammer, M. (2003). *Driver Distraction: a review of the literature*. (Tech. Rep. No. 206). Victoria, Australia: Monash University, Accident Research Centre.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2002). Attention and automation: new perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 178-194.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2006). How do you like your automation? The merits of hard and soft in vehicle technology [proceedings on CD-Rom]. *Proceedings of the IEA 2006 Congress*. Amsterdam: Elsevier.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2007). Back to the future: Break reaction times for manual and automated vehicles. *Ergonomics*, 50, 46-58.
- Young, M. S., Stanton, N. A., & Harris, D. (2007). Driving automation: Learning from aviation about design philosophies. *International Journal of Vehicle Design*, 45(3), 323-338.

- Z -

- Ziegler, W., Franke, U., Renner, G., & Kühnie, A. (1995) Computer Vision on the Road: A Lane Departure and Drowsy Driver Warning System, *Society of Automotive Engineers Technical, paper 952256*.

LEXIQUE

ABS

Abréviation de l'Anglais « Antilock Breaking System ».

ACC

Abréviation de l'Anglais « Adaptive Cruise Contrôle ». Non abrégé, le dispositif a été traduit par « régulateur de vitesse et d'inter-distance » dans le texte.

AM

Amorçage Moteur.

AMSon

Amorçage Moteur et avertissement Sonore latéralisé.

ARCOS

Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée. Projet de recherche précompétitive, s'inscrivant dans le cadre des actions fédératives du PREDIT.

AvSon

Avertissement Sonore latéralisé.

AvSiège

Avertissement vibration Siège latéralisé.

AvSV

Avertissement Sonore et Vibratoire.

AvVib

Avertissement Vibratoire.

AvVol

Avertissement vibration Volant latéralisé.

ESP

Abréviation de l'Anglais « Electronic Stability Program ». Non abrégé, le dispositif a été traduit par « correcteur électronique de trajectoire » dans le texte.

GIAT

Groupement Industriel des Armements Terrestres.

IEA

Abréviation de l'Anglais « International Ergonomics Association ».

INRETS

Institut National de la Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

LFAS

Abréviation de l'Anglais « Lane Following Assistance System ». Non abrégé, le dispositif a été traduit par « système d'aide au suivi d'une voie de circulation » dans le texte.

LIVIC

Laboratoire sur les Interactions Véhicule-Infrastructure-Conducteur.

PREDIT

Programme de Recherche Et d'Innovation dans les Transports terrestres.

PREVENSOR

Coopération homme-machine pour la PREVENTion des SORTies de voie.

PsyCoTec

Nom de l'équipe de recherche « Psychologie, Cognition, Technologie », membre du laboratoire de recherche IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et en Cybernétique de Nantes).

RPL

Régulateur de Position Latérale.

SAM

Systèmes d'Aide au Maintien dans la voie.

SAS

Systèmes d'Avertissement aux Sorties de voies.

SEC

Systèmes d'aide à l'Évitement de Collisions lors de changement de voie.

TLC

Abréviation de l'Anglais « Time to Lane Crossing ». Celui-ci correspond au temps avant qu'une sortie de voie ne se produise si la vitesse et la direction du véhicule ne sont pas modifiées.

TTC

Abréviation de l'Anglais « Time To Contact ». Non abrégé, le dispositif a été traduit par « Temps avant collision » dans le texte.

ANNEXES

I. PLANS EXPERIMENTAUX DE LA PARTIE EXPERIMENTALE 1

I.1 EXPERIENCE 1

Cinq groupes de quatre participants ont été composés. Chaque conducteur réalise deux sessions de conduite de dix tours chacune où sont réparties les trois situations d'intérêt (critique, d'invalidité et nominale) pour les tronçons sélectionnés (cf. Figure 20). Chaque groupe de participants a réalisé les deux sessions de conduite, où les deux tours de familiarisation (Fam) sont au début de la première session (Tableau 25).

Tableau 25. Exemple de passation pour le groupe 1.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Session 1	Fam	Fam	SA	SA	AvSon	AvSon	SA	SA	AM	AM
Session 2	AvVib	AvVib	SA	SA	AMSon	AMSon	SA	SA	AvSV	AvSV

Le tableau 26 présente l'ordre de passation des différents dispositifs d'assistance pour les cinq groupes.

Tableau 26. Ordre de passation des différents dispositifs pour les cinq groupes.

	AvSon	AM	AvSV	AMSon	AvSV
G1	1	2	3	4	5
G2	2	3	4	5	1
G3	3	4	5	1	2
G4	4	5	1	2	3
G5	5	1	2	3	4

L'ordre des évènements a été établi aléatoirement (tableau 27). Pour chaque session expérimentale de dix tours, le même ordre de survenue des événements a été conservé.

Tableau 27. Description de la répartition aléatoire des évènements.
V : virage ; L : ligne droite ; D : sortie à Droite et G : sortie à Gauche).

	Occlusion	Contournement
T 1	V1 & L1(D)	L
T 2	V2 & L2(G)	V
T 3	V2 & L1(D)	L
T 4	V1 & L2(G)	V
T 5	V2 & L2(G)	L
T 6	V1 & L1(D)	V
T 7	V1 & L2(D)	L
T 8	V2 & L1(G)	V
T 9	V1 & L2(D)	L
T 10	V2 & L1(G)	V

Les plans statistiques suivants ont été utilisés :

Situations critiques : $S_4 < G_5 > * M_5 * T_2 * D_2$

Situations de contournements : $S_4 < G_5 > * M_5 * T_2$

Situations nominales : $S_4 < G_5 > * M_5$

avec :

S : Sujets ; **G** : Groupes ; **M** : Mode d'assistance ; **T** : Tronçons (virage et ligne droite) ; **D** : Déviations (à gauche ou à droite)

I.2 EXPERIENCE 2

Cinq groupes de quatre participants ont été composés. Chaque conducteur effectue une session de conduite composée de dix tours précédés par deux tours de familiarisation (cf. tableau 28). Il est à noter que les deux tours de familiarisation sont séparés temporellement du reste de l'expérimentation.

Tableau 28. Exemple de passation pour le groupe 1.

T béta1	T béta2	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Fam	Fam	SA	1	SA	2	SA	3	SA	4	SA	5

Le tableau 29 présente la distribution des passations des différents dispositifs d'assistance pour les cinq groupes.

Tableau 29. *Ordre de passation des différents dispositifs pour les cinq groupes*

	AM	AvVol	AvSiège	AvSon	AMSon
G1	1	2	3	4	5
G2	2	3	4	5	1
G3	3	4	5	1	2
G4	4	5	1	2	3
G5	5	1	2	3	4

Pour l'analyse des situations critiques, le plan statistique suivant a été utilisé : $S_4 \times G_5 \times M_5 \times D_2$ avec :

S : Sujets ; **G** : Groupes ; **M** : Mode d'assistance ; **D** : Déviations (à gauche ou à droite)

II. PLAN EXPERIMENTAL DE LA PARTIE EXPERIMENTALE 2

Deux groupes de neuf participants ont été composés. La répartition des tours avec et sans assistance est présentée dans le tableau 30 pour le premier groupe et dans le tableau 31 pour le deuxième groupe.

Tableau 30. *Répartition des tours avec assistance (A) et sans assistance (SA) pour le groupe 1.*

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Fam	Fam	A	A	A	A	A	A	A	SA	SA	SA	SA

Tableau 31. *Répartition des tours avec assistance (A) et sans assistance (SA) pour le groupe 2.*

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
Fam	Fam	SA	SA	SA	SA	A	A	A	A	A	A	A

Pour l'analyse des situations de contournement, le plan statistique suivant a été utilisé : $S_{10} \times G_2 \times M_2 \times T_2$ avec :

S : Sujets ; **G** : Groupes ; **M** : Modes d'assistance et **T** : Tronçons (où était situé l'obstacle)