



HAL
open science

Evaluation des contraintes mentales dans l'utilisation de systèmes d'aide à la conduite automobile

Caroline Ethève-Théau

► **To cite this version:**

Caroline Ethève-Théau. Evaluation des contraintes mentales dans l'utilisation de systèmes d'aide à la conduite automobile. Psychologie. Université René Descartes - Paris V, 2004. Français. NNT : . tel-01760897

HAL Id: tel-01760897

<https://theses.hal.science/tel-01760897>

Submitted on 6 Apr 2018

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

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

UNIVERSITÉ PARIS V
RENÉ DESCARTES
Laboratoire d'Ergonomie Informatique
12, rue de l'école de médecine
75270 Paris Cédex 06

RENAULT
Service Ergonomie et IHM
Technocentre
1, avenue du Golf
78280 Guyancourt Cédex

THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS V
Discipline : Psychologie Cognitive - Spécialité : Ergonomie

Présentée et soutenue publiquement le 16 décembre 2004

Evaluation des contraintes mentales dans l'utilisation de systèmes d'aide à la conduite automobile

Caroline ETHÈVE-THÉAU

Membres du jury :

Pr Jean-Claude Spérandio : Laboratoire d'Ergonomie Informatique, Université Paris 5 - René Descartes

Pr André Chapon : Laboratoire Ergonomie et Sciences Cognitives pour les Transports, INRETS, Bron

Pr Régis Mollard : Laboratoire Adaptations, Travail, Individu, Université Paris 5 - René Descartes

Pr Charles Tijus : Laboratoire Cognitions Humaine et Artificielle, Université Paris 8

Claire Petit-Boulanger : Direction de la Recherche, Technocentre, RENAULT



*S'il y a tant d'accidents sur les routes, c'est parce que nous avons des voitures de
demain, conduites par des hommes d'aujourd'hui, sur des routes d'hier.*

Pierre-Jean Vaillard

Remerciements

A Jean-Claude Spérandio qui m'a fait découvrir l'ergonomie et m'a guidée tout au long de ce doctorat. Merci pour vos conseils avisés et votre confiance.

Aux membres du L.E.I. et de l'INRETS, en particulier André Chapon, pour la richesse de nos échanges et la pertinence de vos remarques.

A tous mes collègues de RENAULT et tous ceux qui ont participé aux expérimentations. Plus particulièrement, merci Cédric pour ta disponibilité, ton efficacité et ton amitié; Claire pour ton aide précieuse et ta bonne humeur; Jean-Pierre, Alain, Jacques, Françoise, Jean-François, Philippe et Stéphane pour le temps que vous m'avez consacré.

A mes amis et mes frères et sœurs qui ont été là dans les moments difficiles. Merci pour votre compréhension et vos encouragements.

Christiane, Jean-Claude et Anne-Gaël, vous savez la place que vous occupez dans mon cœur, merci d'être là.

A mon père pour m'avoir si bien enseigné que « *la vraie force, c'est d'y croire* ». Merci pour tout ce que tu m'as apporté et m'apporte encore.

Frédéric, mon si cher Frédéric, comment pourrais-je te remercier pour tout ce que tu es pour moi? Ton amour, ta patience, ta présence et ton soutien si précieux ont été indispensables à l'aboutissement de ce travail. Mille mercis.

Enfin, je dédie cette thèse à ma mère qui me manque si souvent et à mon fils, Florent, lumière de ma vie qui, depuis une belle journée d'été, me comble de joie.

EVALUATION DES CONTRAINTES MENTALES DANS L'UTILISATION DE SYSTÈMES
D'AIDE À LA CONDUITE AUTOMOBILE

Les progrès techniques récents offrent d'immenses opportunités pour améliorer la sécurité du conducteur, en l'avertissant notamment de situations accidentogènes. Ils doivent pour cela disposer d'interfaces spécifiques, capables de prévenir le conducteur sans pour autant détourner dangereusement son attention.

L'objet de cette thèse est d'apporter des éléments de réponse à cette problématique grâce aux perspectives offertes par l'ergonomie.

Nous avons d'abord effectué une revue des interfaces classiques ou innovantes et de leurs limites puis nous avons identifié les types de mesures pouvant être utilisées pour les évaluer. Nous avons ensuite validé expérimentalement l'utilisation conjointe de mesures comportementales, électrophysiologiques et verbales, sur piste et sur simulateur. Nous avons ainsi mis en évidence la pertinence d'une utilisation complémentaire de ces différentes techniques.

Nous avons ensuite appliqué la méthode ainsi validée dans l'étude de deux systèmes, Time Warning et Curve Warning, et de deux interfaces innovantes, l'haptique et l'affichage HUD. Ces dernières ont prouvé leur pertinence dans la problématique étudiée.

Mots-clés : Attention, interfaces, haptiques, HUD, système d'aide, conduite automobile.

EVALUATION OF MENTAL CONSTRAINTS INVOLVED IN THE USE OF COMPUTER-AIDED
DRIVING SYSTEMS

Recent technical progress provide real opportunities to improve road safety, by warning the driver of accident-prone situations. They require therefore dedicated interfaces, capable of warning the driver without dangerously diverting his attention.

The purpose of this work is to bring elements to help defining those interfaces, by using the tools and point of view of ergonomics.

First of all, we make a review of classic or innovative interfaces and define their limits. We then identify the types of measures which can be used to evaluate them.

We then evaluate and confirm the efficiency of the conjointed use of behavioral, physiological and verbal measures, both on-track and in drive simulator.

We then apply this methodology in the study of two systems, Time Warning and Curve Warning, and of two innovative interfaces, haptic interfaces and Head-Up-Display, both of them showing a real potential.

Keywords : Attention, interfaces, haptic, HUD, computer-aided driving.

Table des matières

Introduction	xvii
Position du problème	xvii
Apports de l'ergonomie	xix
Plan de la thèse	xx
1 Nouvelles questions posées par l'apparition des systèmes d'aide à la conduite automobile	1
1.1 La tâche de conduite	1
1.1.1 Brève description de la conduite automobile	2
1.1.2 Spécificités de la conduite automobile	7
1.2 Place essentielle de l'attention en conduite automobile	10
1.2.1 Définitions et problématiques de l'attention	10
1.2.1.1 Définitions	10
1.2.1.2 Attention sélective	11
1.2.1.3 Attention partagée	11
1.2.1.4 Vigilance	13
1.2.1.5 Attention active et attention passive	14
1.2.2 Théories du filtrage et hypothèse du canal unique de traitement	15
1.2.2.1 La théorie du filtre de Broadbent	15
1.2.2.2 Limites et améliorations de la théorie du filtre	16
1.2.3 Ressources attentionnelles	17
1.2.3.1 Théorie du « réservoir unique de ressources »	17

1.2.3.2	Théorie des ressources multiples	17
1.2.4	Processus automatiques et processus contrôlés	18
1.2.4.1	Existence de processus automatiques	18
1.2.4.2	Détection automatique et attention contrôlée	19
1.2.4.3	Modèle de l'intégration des traits	21
1.2.5	Conclusion sur les théories de l'attention	21
1.2.6	Cas de la conduite automobile	23
1.3	Besoins des conducteurs et systèmes d'aide à la conduite automobile	25
1.3.1	Limites et besoins des conducteurs	25
1.3.1.1	Limites des conducteurs	25
1.3.1.2	Apport de l'accidentologie automobile	30
1.3.2	Classification des différents systèmes d'aide	34
1.3.2.1	Typologie des systèmes d'aide, selon Bellet, Tattegrain- Veste et Chapon (2001)	34
1.3.2.2	Typologie des systèmes d'aide, selon Dessaigne, Gabaude, Specht, Fouet, Kaplan et Kaplan (1996)	36
1.3.2.3	Typologie des systèmes d'aide, selon Pauzié (2000)	37
1.3.2.4	Typologie selon Emberger (1993)	38
1.3.3	Conclusion	39
1.4	Différentes interfaces pour les systèmes d'aide	40
1.4.1	Interfaces les plus répandues dans les véhicules.	40
1.4.1.1	Les interfaces visuelles	40
1.4.1.2	Les interfaces sonores	44
1.4.2	Les limites des interfaces existantes	45
1.4.3	Nouvelles interfaces envisageables pour ces systèmes	47
1.4.3.1	Concernant la modalité visuelle	47
1.4.3.2	Concernant la modalité sonore	52
1.4.4	Les autres modalités sensorielles	56
1.4.4.1	Les interfaces haptiques	56

1.4.4.2	Les interfaces olfactives	61
1.5	Conclusion	62
2	L'évaluation de l'interaction conducteur/système	65
2.1	Critères d'évaluation des systèmes d'aide	65
2.1.1	L'utilité de l'aide	66
2.1.2	L'utilisabilité	66
2.1.3	L'efficacité	67
2.1.4	La fiabilité	67
2.1.5	La non-dangerosité	67
2.1.6	La satisfaction des conducteurs	67
2.2	Critères d'évaluation pour la présentation des informations	68
2.2.1	Pertinence des informations	68
2.2.2	Une perception rapide	68
2.2.3	Une présentation sans ambiguïté	69
2.2.4	Une présentation « non intrusive »	69
2.3	Méthodologie d'évaluation	70
2.3.1	L'accidentologie versus la démarche expérimentale	70
2.3.2	Différents moyens d'expérimentation	71
2.3.2.1	En laboratoire	71
2.3.2.2	Avec un simulateur	72
2.3.2.3	Sur piste	72
2.3.2.4	Sur route	72
2.3.3	Les mesures classiquement utilisées dans la littérature	73
2.3.3.1	Les critères d'évaluation d'un instrument de mesure	73
2.3.3.2	Description des mesures	75
2.3.3.3	Conclusion concernant les mesures utilisées dans la littérature	115

3	Mise au point d'une méthodologie d'évaluation des systèmes d'aide à la conduite	119
3.1	Première étude préliminaire : Évaluation d'indicateurs pertinents et de la piste comme moyens d'évaluation de systèmes d'aide	121
3.1.1	Principes et méthodes de l'étude	121
3.1.1.1	Hypothèses	121
3.1.1.2	Population d'étude	122
3.1.1.3	Choix des paramètres à mesurer	122
3.1.1.4	Procédure et consigne	123
3.1.1.5	Plan expérimental	125
3.1.2	Analyse des résultats	126
3.1.2.1	Effet de la couleur (associé au degré d'urgence)	127
3.1.2.2	Effet du bip sonore	128
3.1.2.3	Effet du clignotement	129
3.1.2.4	Interaction entre la couleur et le bip sonore	130
3.1.2.5	Interaction entre la couleur et le clignotement	131
3.1.2.6	Tableaux récapitulatifs	132
3.1.3	Interprétation des résultats	132
3.1.4	Conclusion de la première étude préliminaire	137
3.2	Seconde étude préliminaire : validation des indicateurs retenus pour une évaluation réalisée sur simulateur dynamique	138
3.2.1	Principes et méthodes de l'étude	138
3.2.1.1	Population d'étude	139
3.2.1.2	Choix des paramètres à mesurer	139
3.2.1.3	Déroulement de l'expérimentation	140
3.2.2	Analyse et interprétation des résultats	141
3.2.2.1	Définition des zones d'intérêt	143
3.2.2.2	Résultats concernant le comportement du conducteur	143
3.2.2.3	Conclusions sur le comportement du conducteur	150

3.2.2.4	Distinction des sorties de voies volontaires / involontaires	151
3.2.3	Conclusion de l'étude	154
3.3	Conclusion du chapitre	155
4	Interfaces innovantes et systèmes d'assistance	159
4.1	Le Time Warning : un système nécessitant des interfaces innovantes	161
4.1.1	Présentation du système	161
4.1.2	Mise au point du Time Warning	162
4.1.2.1	Définition du cahier des charges fonctionnel	162
4.1.2.2	Expérimentation sur banc	171
4.1.2.3	Expérimentation sur route	172
4.1.2.4	Conclusion des deux expérimentations	174
4.1.2.5	Description des interfaces envisageables pour le Time Warning	174
4.1.3	Évaluation du Time Warning	178
4.1.3.1	Description de l'expérimentation réalisée	178
4.1.3.2	Résultats	180
4.1.3.3	Conclusion concernant le Time Warning	209
4.2	Interfaces innovantes appliquées au système Curve Warning	210
4.2.1	Présentation du système	210
4.2.2	Mise au point des interfaces à évaluer	213
4.2.3	Evaluation du Curve Warning	216
4.2.3.1	Résultats issus de l'entretien-bilan	217
4.2.3.2	Conclusion	223
4.2.4	Conclusion concernant les interfaces innovantes	224
4.3	Comparaison de deux technologies possibles pour l'affichage des interfaces visuelles en bas de pare-brise	226
4.3.1	Évaluation sur piste	228
4.3.1.1	Principes et méthodes de l'étude	228
4.3.1.2	Variables de l'étude	229

4.3.1.3	Résultats de l'expérimentation sur piste	230
4.3.2	Évaluations « longue durée » en conduite réelle	232
4.3.2.1	Principes et méthodes de l'étude	232
4.3.2.2	Résultats des évaluations « longue durée »	233
4.3.3	Conclusion de l'étude	234
4.4	Conclusion du chapitre	235
5	Discussion générale	239
5.1	Récapitulatif de la problématique	239
5.2	Récapitulatif de la mise au point d'une méthodologie	240
5.3	Récapitulatif de la mise au point des interfaces	242
5.4	Perspectives pour l'entreprise	244
5.5	Conclusion	244
	Bibliographie	247

Table des figures

1.1	Affichages de premier niveau - Zone A1	42
1.2	Affichages de deuxième niveau - Zones A2 ou A3	42
1.3	Affichages de troisième niveau - Zone A4	43
2.1	Méthode de mesure de la Durée de la Perturbation Ohmique lors d'une réponse de la résistance cutanée	84
2.2	Systèmes de décodage de la réponse électrodermale en potentiel	85
2.3	Dépendance Performance - Charge mentale	109
4.1	Modèle d'arrivée sur un véhicule	164
4.2	Arrivée sur un obstacle déjà à l'arrêt	165
4.3	Suivi d'un véhicule « cible » roulant quasiment à la même vitesse	166
4.4	Arrivée sur un véhicule « cible » roulant moins vite	167
4.5	Arrivée sur un véhicule « cible » qui décélère	168
4.6	Insertion d'un véhicule « cible » dans la trajectoire	169
4.7	Changement de voie du véhicule équipé et arrivée sur un véhicule « cible »	170
4.8	Interfaces possibles pour le Time Warning	177
4.9	Taux de réponses phasiques électrodermales suivant la modalité	191
4.10	Délai de la réponse phasique électrodermale suivant la modalité de l'alerte associée au système Time Warning	192
4.11	Temps pendant lequel le conducteur est soumis à l'alerte associée au sys- tème Time Warning, suivant l'interface proposée.	193
4.12	Temps de suivi moyen suivant la portion du parcours	201
4.13	Variation des temps de suivi par rapport à la portion de l'essai	202

4.14 Temps de suivi moyen (en secondes) des différents groupes	203
4.15 Répartition du temps passé en dessous et au dessus du seuil des deux secondes par groupe	204
4.16 Ratio des différentes répartitions du temps de suivi par rapport au seuil des 2 secondes	205
4.17 Durée moyenne des intervalles au dessus et en dessous de 2 secondes	207
4.18 Ratio de la durée moyenne passée dans chaque intervalle	208
4.19 Interfaces du Curve Warning	215
4.20 Exemples d’affichage du HUD	227
4.21 Zone d’affichage réservée aux alertes	229
4.22 Zone d’affichage partagée	229
4.23 Temps de réponse associés à la technologie d’affichage	230

Liste des tableaux

1.1	La conduite automobile comprend trois types de tâches. (Briois, 1998) . . .	5
1.2	Décomposition du temps de lecture en fonction de la zone d’affichage . . .	50
3.1	Description des scénarios	142
3.2	Description des zones d’intérêt	144
3.3	Charge attentionnelle (DPO en seconde) selon l’événement	149
3.4	Taux de réponses émotionnelles selon le scénario	150
4.1	Ressentis sur le retour de force	174
4.2	Constitution des groupes	179
4.3	Définition des groupes	189
4.4	Temps suivi moyen des conducteurs sur la portion contrôle (les conducteurs n’ont aucune assistance) en fonction de leur groupe d’affectation	194
4.5	Temps suivi moyen des conducteurs sur la portion test en fonction de leur groupe d’affectation	195
4.6	Temps de suivi moyen (en secondes) en fonction du groupe d’appartenance et des différentes situations de conduite	199
4.7	Appréciations des interfaces haptiques par les conducteurs en fonction des systèmes auxquels elles sont associées.	224
4.8	Appréciations des interfaces visuelles par les conducteurs en fonction des systèmes auxquels elles sont associées	225

Introduction

Position du problème

Améliorer la sécurité des usagers de la route devient un impératif de plus en plus pressant des pouvoirs publics, des constructeurs automobiles, de certains centres de recherche et laboratoires universitaires. Or, d'après Pages¹, le facteur humain est très souvent mis en cause dans les accidents de la route : dans un cas sur deux, un problème de perception du conducteur est mis en évidence et des problèmes de perception et de compréhension sont impliqués dans 85 % des accidents étudiés (Pages, 2000). Ce constat souligne l'opportunité d'intégrer des systèmes techniques permettant d'assister le conducteur dans sa tâche de conduite.

Dans un premier temps, les progrès technologiques ont permis d'intégrer différents systèmes d'aide à bord du véhicule (aide à la navigation, régulateur de vitesse, etc.). Leur objectif principal était d'assister le conducteur essentiellement dans les situations de conduite nominales, en prenant partiellement ou totalement en charge certaines sous-tâches de son activité de conduite. L'introduction de nouvelles technologies dans les automobiles et dans les infrastructures amène de nouvelles opportunités permettant d'aider le conducteur lorsqu'il est confronté à des situations inattendues, monotones ou dangereuses qui peuvent conduire à un accident. Mais le problème actuel est autant de développer techniquement ces aides que de savoir comment présenter les informations au conducteur pour qu'elles interfèrent le moins possible avec sa tâche de conduite tout en étant perçues dans des délais adaptés. La présentation des informations dans une automobile est, en

¹Études menées au sein du Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique et d'étude du comportement humain (LAB), commun à PSA Peugeot Citroën et Renault.

effet, particulièrement complexe car elle doit répondre au paradoxe suivant : d'une part, les informations nécessaires au conducteur pour sa tâche de conduite doivent bien évidemment être perçues et comprises dans des délais compatibles avec cette tâche, mais d'autre part, elles ne doivent pas être dangereuses pour le conducteur en accaparant son attention à mauvais escient. Le principal problème associé à ces systèmes est alors de savoir quand et comment prévenir un conducteur qu'il se trouve dans une situation particulièrement critique. Les situations de conduite de ce type étant particulièrement dangereuses pour la sécurité des usagers et les contraintes temporelles très fortes, l'alarme émise par le système doit alors être suffisamment intrusive pour être perçue, immédiatement comprise par le conducteur dès sa première apparition, mais ne doit pas induire une réaction inappropriée. Les interfaces de ces systèmes doivent donc être particulièrement bien adaptées à ces situations. Une présentation judicieuse des informations pertinentes, sans surcharger la capacité de traitement des informations du conducteur, semble alors indispensable. Il est alors nécessaire de pouvoir évaluer les différents modes de présentation des informations et les risques qu'ils génèrent pour le conducteur et les autres usagers. Idéalement, tout système se voulant « système d'aide », doit être à même de fournir au conducteur l'information dont il a besoin, au bon moment. Cette information doit être présentée de façon telle qu'elle sera immédiatement comprise par le conducteur et provoquera une réaction adaptée à la situation de conduite, dans un délai acceptable. La capacité d'un système et plus particulièrement de son interface, à attirer l'attention du conducteur sur le « problème » à traiter est essentielle. Or les alarmes classiquement utilisées dans la voiture (ex : icône visuelle, bip sonore) apparaissent comme insuffisantes. D'autres solutions d'interfaces (interfaces haptiques², présentation d'icônes via un système « vision tête haute ») ont été conçues et font l'objet d'une évaluation dans le cadre de cette thèse. Nous verrons à ce sujet que la méthodologie d'évaluation de ces systèmes et de leurs interfaces peut se révéler problématique.

²Les interfaces haptiques correspondent aux interfaces qui « sont ressenties via les sensations et les perceptions tactiles, vestibulaires, ou kinesthésiques »(Tijerna et al., 2000).

Apports de l'ergonomie

La problématique des systèmes d'aide à la conduite se prête particulièrement bien à une approche ergonomique. Notre objectif n'est pas d'évaluer un système d'aide en lui-même, mais bien de l'évaluer en prenant en compte son impact sur le comportement du futur utilisateur et les interactions entre le conducteur et le système qu'il utilise durant sa conduite. Dans une logique d'ergonomie de conception, le questionnement portera sur « la capacité qu'aura un conducteur à percevoir et utiliser de façon optimale les informations qui lui seraient fournies par les systèmes d'aide, compte tenu de son fonctionnement effectif dans la réalisation d'une tâche donnée, comportant déjà un certain nombre d'informations à traiter et d'objectifs à atteindre »(Van Elslande et Nachtergaele, 1992).

Les études portant sur le facteur humain dans le domaine de l'automobile sont très nombreuses ainsi que les approches utilisées pour aborder des sujets aussi variés que le confort des occupants de la voiture, leur sécurité (active ou passive), la modélisation de l'activité de conduite, les systèmes d'aide à la conduite, etc. Que ce soit via une approche issue de la physiologie, de la psychologie, de la psycho-physiologie ou de l'ergonomie, les différentes études ont porté sur les interactions entre les usagers, leur véhicule ou leur environnement. Dans cette thèse, une place importante sera accordée à l'analyse de la méthodologie permettant d'évaluer de nouveaux concepts de présentation des informations au conducteur. Il est alors important d'obtenir des indicateurs fiables permettant d'évaluer l'impact de ces nouvelles interfaces sur la tâche de conduite en termes de coûts perceptif et cognitif pour le conducteur. Or, des différentes méthodologies mises en œuvre au cours des nombreuses études portant sur le conducteur automobile, aucune ne semble cependant être la panacée. En particulier, aucune ne met le conducteur dans une situation habituelle de conduite : généralement, le conducteur effectue un trajet imposé, en conduite réelle ou simulée, dans un véhicule qui n'est pas le sien, équipé de capteurs et en présence d'un ou plusieurs expérimentateurs ou observateurs. Nous mettrons ainsi l'accent sur la validité et l'utilisabilité d'une méthodologie incluant entre autres des paramètres physiologiques sensibles à l'attention et au stress.

Plan de la thèse

La première partie de cette thèse se compose de deux chapitres. Dans le premier, nous abordons les nouvelles questions que pose l'apparition des systèmes d'aide à la conduite automobile et analysons le paradoxe associé à la présentation des informations qui doit être intrusive mais sans danger. L'accent sera mis sur les limites des interfaces classiques qui utilisent essentiellement les modalités visuelle et sonore et sur le côté prometteur d'interfaces plus innovantes comme les interfaces haptiques ou celles visuelles présentées en vision tête haute (HUD). Ces interfaces innovantes sont peut-être plus adaptées aux systèmes d'assistance associés aux situations critiques, notamment en termes de partage d'attention. Cependant, une validation expérimentale est nécessaire, permettant de comparer les différentes solutions. Un nouveau problème se pose alors : celui de la méthodologie d'évaluation. Il nous faut identifier les moyens dont nous disposons pour cette évaluation, rechercher une méthodologie qui puisse être appropriée à notre problématique et surtout savoir comment évaluer l'interaction conducteur / système.

Le deuxième chapitre fait le point sur les différentes méthodes d'évaluation, les différents critères et les différents indicateurs qui se trouvent dans la littérature pour le domaine de l'automobile. Nous le comparons au domaine de l'aviation, car certaines études menées dans l'aviation nous ont paru transposables au milieu automobile.

La seconde partie est dédiée aux différentes expérimentations menées dans le cadre de cette thèse. Dans le chapitre 3, nous avons validé expérimentalement différents indicateurs et moyens expérimentaux. Nous avons utilisé entre autres la réponse électrodermale, les questionnaires, les entretiens et les temps de réponse sur deux moyens d'expérimentation : la piste et le simulateur dynamique. Les résultats obtenus ont mis en évidence les limites de ces moyens. Bien qu'adaptés à une évaluation ponctuelle des systèmes et de leurs interfaces, la piste et le simulateur ne parviennent pas à refléter l'activité réelle de conduite. Pour une évaluation plus globale et surtout plus proche des conditions futures d'utilisation, la conduite sur route semble plus appropriée.

Dans le chapitre 4, nous avons retenu comme moyen d'expérimentation la conduite en situation réelle sur route ouverte, plus proche de l'activité réelle de conduite et, comme

indicateurs, la réponse électrodermale, les questionnaires, les temps de réponse. Nous avons appliqué cette méthodologie pour évaluer différents systèmes d'aide à la conduite automobile, comportant plusieurs interfaces possibles. En particulier, nous avons testé des interfaces haptiques pour le Time Warning et le Curve Warning en les comparant aux interfaces classiquement utilisées. Enfin, nous avons comparé deux solutions d'affichage d'informations en vision tête haute

Les différents résultats sont discutés au cours du cinquième et dernier chapitre où nous abordons également l'apport de ces études pour le constructeur qui a co-encadré cette thèse.

Chapitre 1

Nouvelles questions posées par l'apparition des systèmes d'aide à la conduite automobile

Afin d'appréhender au mieux la problématique de l'introduction des systèmes d'aide à la conduite automobile, il est nécessaire de décrire et classer ces systèmes d'aide et de préciser à quels besoins spécifiques de la tâche de conduite ils répondent.

Nous nous attacherons tout d'abord à décrire la tâche de conduite et à en définir les spécificités, sous l'angle notamment des théories de l'attention. Celles-ci seront ensuite détaillées et nous amèneront à évaluer les limites des conducteurs face à la tâche de conduite, limites que les systèmes d'aide doivent être à même de faire dépasser. Enfin, nous décrirons les différentes formes que ces systèmes d'aide sont ou seront en mesure d'adopter, notamment à travers les interfaces. Au delà de leur diversité, nous verrons à quelles contraintes particulières ces systèmes doivent répondre, notamment sous l'angle des problématiques attentionnelles.

1.1 La tâche de conduite

La mise au point des systèmes d'aide à la conduite n'est pas sans rencontrer certains problèmes qui tiennent au fait que pour être efficaces et acceptables, ils doivent être

adaptés à la tâche de conduite et à ses spécificités. Nous présentons brièvement celles-ci dans les paragraphes suivants.

1.1.1 Brève description de la conduite automobile

La description de la tâche automobile dans la littérature offre plusieurs variantes, dont nous ne présentons ici qu'un échantillon. Au delà des différences relevées entre les auteurs, il est important de souligner le dénominateur commun que constitue la complexité. De l'avis de Parkes (1991), la tâche primaire du conducteur est le contrôle du véhicule dans le trafic. Cela semble assez trivial de prime abord, mais lorsqu'il s'agit de décrire l'activité de conduite, la simplicité disparaît. La conduite automobile, en apparence très simple, est souvent décrite dans la littérature spécialisée comme une tâche complexe qui demande une adaptation permanente dans un environnement changeant continuellement. Il s'agit d'une activité finalisée, consistant en un déplacement dans un environnement spatial donné. Elle nécessite une adaptation du conducteur qui doit assurer le contrôle et la maîtrise du véhicule ainsi qu'un ajustement perpétuel à l'environnement routier et à la trajectoire du véhicule. Il y a une interaction entre le conducteur, son véhicule et son environnement routier.

Saad définit la conduite automobile comme « une tâche complexe, à caractère dynamique, soumise à des contraintes temporelles exigeant de la part du conducteur des adaptations continues aux différentes situations rencontrées et à leurs variations et impliquant la réalisation de diverses sous-tâches et leur coordination. »(Saad, 1975).

On peut toutefois se demander si c'est la conduite automobile elle-même qui est complexe ou si c'est sa description, compte tenu du grand nombre de variables à prendre en compte. La conduite automobile ainsi définie peut être qualifiée de tâche complexe si l'on se réfère à la définition de la complexité de De Keyser. Selon cet auteur, la complexité d'un système se caractérise notamment par un environnement comportant de multiples variables en interaction, par une dynamique temporelle, des objectifs peu clairs et parfois conflictuels et, dans certains cas, un risque élevé (De Keyser, 1988), ce qui se retrouve dans l'activité de conduite automobile. Toutefois, on doit noter que, complexe ou non, la

conduite automobile est faite très correctement par de nombreux individus sans qualification particulière et ce après un apprentissage limité (ce qui n'est pas le cas de nombreuses tâches professionnelles).

Certains auteurs (Flores, 1990 ; Michon, 1985), appliquant le modèle de Rasmussen (Rasmussen, 1986 ; Rasmussen et Lind, 1982), considèrent la tâche de conduite comme une activité de résolution de problème où, selon le niveau de complexité du problème, le conducteur doit élaborer une stratégie, rechercher une procédure ou fournir une réponse automatisée.

Selon Neboit (1980), conduire un véhicule, c'est effectuer un déplacement dans un environnement en perpétuelle évolution. Ce déplacement est orienté vers un but (par exemple rallier un lieu particulier), il est soumis à différentes règles explicites ou implicites et il s'effectue au moyen d'un outil particulier, le véhicule.

Cette activité suppose de prendre connaissance des états de l'environnement afin de maintenir le véhicule dans une trajectoire et à une vitesse compatible avec les exigences du système et les critères de sécurité que se fixe le conducteur (Tétard, 1987).

Pour Monseur et Merchadier (1971), la conduite est constituée d'une succession de phases où alternent des sous-tâches à dominante sensori-motrices et des sous-tâches à dominante cognitive, selon la complexité associée au contexte de conduite.

Lorsque la situation de conduite ne nécessite pas un traitement cognitif complexe (situation de conduite sur autoroute avec peu de trafic par exemple), le conducteur développe une activité à forte dominance sensori-motrice, qui consiste essentiellement en un contrôle du véhicule. En revanche, dès que la situation de conduite nécessite une prise d'information, une analyse poussée de la situation, un traitement de l'information et une prise de décision d'action, l'activité du conducteur acquiert une forte dominance cognitive.

On retrouve cette partition chez Perruchet (1988) qui distingue dans l'activité de conduite une composante fortement automatisée (contrôle de la trajectoire, maintien du véhicule dans la voie, ...) et une composante plus attentionnelle (analyse de la situation, prise de décision, ...).

Allen, Lunenfield et Alexander (1971) ont défini, suite à des observations de l'activité

réelle de conduite, un modèle hiérarchique de la tâche de conduite selon trois niveaux de performance : la macroperformance, la performance situationnelle et la microperformance.

La macroperformance intègre l'ensemble des tâches de conduite en rapport avec la planification de l'itinéraire et la navigation (par exemple prévision de l'itinéraire, suivi du parcours, modification en temps réel du trajet initialement prévu, etc.). Elle inclut également d'autres tâches subsidiaires telles que les opérations de maintenance du véhicule.

La performance situationnelle se rapporte à la gestion de la situation courante. Elle intègre l'ensemble des tâches mises en œuvre pour s'adapter à la situation de conduite du moment, combinant un environnement routier et des conditions de trafic spécifiques.

La microperformance intègre l'ensemble des tâches en rapport avec le contrôle du véhicule, principalement pour ce qui est de sa vitesse et de sa trajectoire. Ces trois niveaux de performances s'inscrivent dans une échelle de temps différente. La macroperformance s'inscrit dans le long terme (d'une dizaine de secondes à plusieurs heures), la performance situationnelle dans le moyen terme (quelques secondes) et la microperformance dans le très court terme (souvent inférieur à la seconde) (Bellet, 1998).

Certains modèles plus récents se sont inspirés de ce modèle à trois niveaux (cf. tableau 1.1 en page 5).

De même, Poyet (1989) décrit l'activité de conduite automobile comme relevant de trois catégories possibles :

- la navigation (niveau stratégique), définie en fonction d'une destination, d'un trajet à suivre ;
- le guidage (niveau tactique) qui permet de diriger le véhicule dans l'environnement routier, tout en respectant les règles de conduite ;
- le contrôle de trajectoire ou manœuvre qui permet de réguler le comportement du véhicule.

Ces trois types de tâches ne sont pas indépendantes les unes des autres et sont souvent réalisées simultanément. Le conducteur doit constamment s'adapter à la situation de conduite, qui est une tâche très dynamique dans un environnement sans cesse modifié

Types de tâches (selon Allen et al., 1971)	(Michon, 1985)	(Flores, 1990)
Niveau I : Microperformances de type automatique	Niveau opérationnel consistant à agir sur les pédales, le volant, la boîte de vitesse : le contrôle de la trajectoire	Tâches de contrôle de vitesse et de la trajectoire
Niveau II : Performances situationnelles de type automatique ou contrôlé selon le niveau d'habileté des conducteurs	Niveau tactique consistant à effectuer les manœuvres de contrôle, à diriger le véhicule, en fonction de l'environnement routier, des règles de circulation, des signalisations : la guidance	Tâches d'adaptation aux autres usagers et à l'environnement routier
Niveau III : Macroperformances de type contrôlé	Niveau stratégique consistant à planifier un itinéraire, à suivre une direction, un trajet, ce qui inclut des buts de voyage, ainsi qu'une évaluation des risques et des coûts à mettre en œuvre : la navigation	Tâches de planification de trajet

TAB. 1.1 – La conduite automobile comprend trois types de tâches. (Briois, 1998)

et influencé par les conducteurs (De Waard, 1996). L'évolution constante de la situation de conduite a pour conséquence de modifier l'ordre des tâches à accomplir en priorité : chacune des tâches définies ci-dessus peut à tout instant devenir prioritaire par rapport aux autres, quel que soit son niveau de complexité. L'opérateur doit ainsi adapter en permanence ses ressources cognitives à la gestion simultanée des différentes tâches qu'il a à accomplir. Il construit son activité de conduite en fonction du contexte de conduite qui est en constante évolution, mais également en fonction de ses propres connaissances, de ses modèles mentaux. Il n'utilise pas toutes ses connaissances au même moment, mais uniquement celles qui lui semblent appropriées au contexte (Poyet, 1989). L'utilisation de ces schémas mentaux lui permet une « économie cognitive » et une moindre allocation de ressources cognitives à certaines tâches pouvant être réalisées de façon plus ou moins automatique et donc plus ou moins « économique ».

Saad a défini un modèle de l'activité du conducteur (Saad, 1987) permettant de prendre en compte l'adaptation perpétuelle du conducteur à son environnement. Elle y décrit les étapes nécessaires à cette adaptation :

1. la phase d'exploration perceptive où le conducteur va rechercher et prélever de l'information dans l'environnement ;
2. la phase d'identification de cette information qui permet de prévoir les différents obstacles susceptibles d'intervenir ;
3. le conducteur décide d'une stratégie d'action ;
4. le conducteur exécute l'action.

Toutes ces descriptions de la tâche ou de l'activité de conduite mettent en évidence sa complexité. Celle-ci n'implique pas nécessairement la notion de difficulté. Les conducteurs expérimentés parviennent d'ailleurs facilement à conduire, même dans des conditions dégradées (état de fatigue, pluie, etc.). La complexité de la conduite automobile réside plutôt dans le nombre important de tâches à réaliser, plus ou moins simultanément, pour parvenir à la destination finale. De plus, outre les nombreuses sous-tâches associées à la conduite automobile, le conducteur n'est pas isolé et son environnement lui permet de réaliser de nombreuses activités annexes durant sa conduite : discuter avec les passagers, surveiller les enfants, téléphoner, écouter la radio, etc. Notons ici qu'une des caractéristiques de la conduite automobile est que les situations tranquilles, exigeant du conducteur peu de ressources, peuvent se transformer brutalement en une situation qui sollicite la pleine capacité du sujet à réagir promptement de façon optimale, sans droit à l'erreur. La conduite automobile nécessite ainsi réellement un partage constant des ressources perceptives et cognitives du conducteur, entre d'une part des sources d'informations différentes et, d'autre part, différentes tâches à réaliser.

Il est par ailleurs intéressant de comparer cette activité à d'autres activités humaines. La conduite automobile, par son caractère dynamique, peut être comparée à l'ensemble des tâches de contrôle de processus continus comme le contrôle de procès industriel, le contrôle aérien (Hoc, 1996) ou à d'autres activités centrées sur le pilotage de mobiles (aéronefs, trains, navires, etc.). Une des caractéristiques principales d'un processus dynamique est que, même si l'opérateur n'intervient pas, le processus évolue. La tâche principale de l'opérateur réside avant tout dans le maintien du processus dans des limites de fonctionnement les plus proches possibles de l'optimal et dans la mise en œuvre, le cas échéant, des actions

correctives nécessaires au non franchissement de ces limites. Pour être efficace, l'opérateur qui gère une situation dynamique doit pouvoir anticiper et prévoir son évolution dans le temps (Amalberti, 1996 ; Hoc, 1996 ; Neboit, 1980)

Bellet (1998) énonce les activités cognitives que la conduite automobile requiert du conducteur :

1. « sélectionner, dans un environnement, les informations pertinentes en vertu de ses objectifs et des exigences de la tâche,
2. interpréter la situation immédiate et d'anticiper son évolution à plus ou moins long terme ,
3. prendre des décisions en vue de s'adapter et d'interagir avec son environnement (via un dispositif technique particulier), de façon adaptée au contexte situationnel,
4. gérer ses propres ressources et limites de manière à satisfaire les contraintes, notamment temporelles, inhérentes au caractère dynamique de la situation. »

Précisons que l'aspect sélectif de la prise d'information est particulièrement important puisque l'opérateur ne peut que rarement prélever de façon exhaustive toutes les données disponibles dans son environnement. Ce filtrage informationnel ne se fait pas au hasard mais résulte des objectifs et des connaissances du sujet, de l'interprétation que l'opérateur élabore de son environnement, c'est-à-dire de la représentation qu'il se fait de la situation immédiate et de son évolution dans le temps. Ces représentations vont piloter les décisions et les actions mises en œuvre par l'opérateur (Bellet, 1998). Comme tout environnement dynamique, le contexte routier requiert une adaptation permanente du conducteur. A chaque instant, il doit tenir compte d'évènements rencontrés et potentiels afin de réguler son activité. De ce point de vue, la conduite automobile présente des similarités avec nombre d'activités professionnelles en situation dynamique, mais elle comporte aussi certaines spécificités.

1.1.2 Spécificités de la conduite automobile

Une différence majeure entre la conduite automobile et les autres activités de contrôle de processus dynamiques est que la grande majorité des conducteurs ne sont pas profes-

sionnels. La voiture est utilisée comme moyen de transport et non comme un outil et nous n'étudions pas dans ce cadre un opérateur dans un contexte de travail défini, mais plutôt un usager, pouvant se retrouver dans des situations d'une extrême diversité : diversité entre les conducteurs (âge, expérience, sexe, etc.), diversité pour un même conducteur (état physique et psychologique varient au cours de la journée, etc.), diversité au niveau du véhicule (poids, « état de marche », nouvelle voiture, etc.), diversité de l'environnement (conditions météorologiques, trafic, type de route, etc.).

En conduite automobile, la tâche est beaucoup moins prescrite que pour les conducteurs des autres moyens de transport (avion, train, bateau), puisqu'elle se limite à la réglementation du code de la route (Saad, 1975).

La diversité des conducteurs est réellement plus importante que celle observée dans l'aviation professionnelle par exemple, où les pilotes sont fortement sélectionnés (bonne santé physique et mentale), régulièrement entraînés à utiliser les systèmes et leurs interfaces, utilisant un langage commun international, etc.

Contrairement aux pilotes d'avion et aux conducteurs de train, les conducteurs de voiture n'ont pas eu de formation spécifique sur les différentes aides qui leur sont proposées. De plus, la formation initiale à la conduite (une vingtaine d'heures de pratique) n'est jamais réactualisée et aucun contrôle d'aptitudes physiques ou psychologiques n'est imposé au cours de la vie du conducteur, sauf pour les professionnels des véhicules poids lourds ou transport en commun.

Ce n'est pas un métier (sauf exception) et le conducteur considère sa voiture comme un bien personnel ; c'est un mode de déplacement individuel et la responsabilité engagée par rapport aux autres dans la conduite automobile est beaucoup moins évidente. La conscience du risque est alors moins présente chez le conducteur automobile et on entend souvent : « moi, je conduis très bien, ce sont les autres... ». En revanche les pilotes d'avion ou les conducteurs de train ont conscience qu'ils ont la responsabilité de centaines de passagers et sont par conséquent plus sensibles aux consignes de sécurité et les respectent davantage.

Comparativement aux conducteurs de train ou aux pilotes, le conducteur d'automobile

bile assume seul la quasi-totalité des opérations nécessaires à son déplacement (Bellet, 1998), peu de systèmes d'aide équivalents à ceux présents dans les milieux professionnels du transport étant intégrés dans les automobiles actuelles. Même si les aides à l'optimisation d'itinéraires commencent à se répandre, c'est encore loin d'être le cas général. Et, de toute façon, l'anti-collision est assurée complètement sous la seule responsabilité des conducteurs.

Les contextes de conduite sont extrêmement variés et nécessitent une adaptation constante de l'opérateur dans des délais très courts (souvent de l'ordre de la seconde). Les interfaces installées dans les véhicules doivent être à même d'être perçues quel que soit l'environnement, notamment l'environnement sonore qui peut être extrêmement varié (fenêtre ouverte, radio en marche, ...)

Alors que les différents dispositifs techniques sont régulièrement contrôlés dans le milieu professionnel (contrôle aérien, aviation, etc.), l'automobiliste utilise parfois ces dispositifs et même son véhicule dans des conditions dégradées (pneus sous gonflés, tachymètre H. S. , faux contact de certains voyants, etc.)

Enfin, la prise d'information visuelle nécessaire à la conduite automobile concerne essentiellement la scène routière vue à travers le pare-brise et donc l'environnement extérieur. En revanche, dans les autres activités de contrôle de processus dynamiques, la prise d'information visuelle concerne surtout les affichages médiatisés (cadrons divers, synoptiques, écrans d'ordinateur...) mis à la disposition des opérateurs, où sont représentés, entre autres, l'état du système, l'environnement extérieur, etc. Peu d'informations sont prélevées directement dans l'environnement extérieur et les pilotes d'avions peuvent même réaliser, par exemple, des atterrissages dans des conditions de visibilité extérieure très dégradées. De même, les salles de contrôle de process sont souvent éloignées du process à contrôler car le pilotage de ces installations ne nécessite pas (sauf exception) un contrôle visuel direct des installations elles-mêmes. Nous aborderons à nouveau cette spécificité lorsque nous nous intéresserons à la présentation d'informations au conducteur durant sa conduite.

1.2 Place essentielle de l'attention en conduite automobile

Comme nous l'avons vu précédemment, la conduite automobile nécessite un partage constant de l'attention du conducteur entre différentes tâches et différentes sources d'information. Afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents, nous rappellerons les définitions et problématiques de l'attention. Nous présenterons ensuite les différents points de vue théoriques concernant cette notion. Nous nous intéresserons enfin plus particulièrement à la déclinaison de ces processus attentionnels dans la conduite automobile.

1.2.1 Définitions et problématiques de l'attention

1.2.1.1 Définitions

Il existe dans la littérature de nombreuses définitions de l'attention. Elles ont en commun de souligner l'action de fixer le traitement de l'information sur quelque chose, en quelque sorte la concentration de l'activité mentale sur un objet déterminé, selon deux modalités majeures : l'orientation et la focalisation (zoom).

Selon James, l'un des pionniers de cette notion, cité par Mialet (1999), « être attentif c'est prendre possession par l'esprit, sous une forme vive et claire, d'un objet ou courant de pensée parmi tous ceux qui paraissent se présenter simultanément. Focalisation, concentration de la conscience sont de son essence. Cela implique se retirer de certaines choses pour en traiter d'autres efficacement. »(James, 1890)

Dans le *Vocabulaire philosophique* (Cuvillier, 1988), l'attention est définie comme une « concentration de l'activité mentale sur un objet déterminé ».

Selon le *Vocabulaire de la psychologie* (Piéron, édition 2003), l'attention se définit comme « une orientation mentale élective comportant un accroissement d'efficacité dans un certain mode d'activité, avec inhibition des activités concurrentes. »

Mialet (1999) souligne quant à lui qu'« à l'inverse des autres grandes fonctions psychologiques telles que la perception, la mémoire, l'imagination, l'attention n'a pas de produit spécifique. En fait, elle participe à toutes les activités mentales, dont elle module le fonc-

tionnement. Elle concerne le fonctionnement du psychisme et non sa structure. » L'attention est un processus sous-jacent aux autres fonctions cognitives (perception, mémorisation, etc.) et permet de traiter les informations pertinentes en priorité, par des processus de focalisation et de filtrage.

La mise en jeu de l'attention s'inscrit suivant trois problématiques différentes pour l'individu : l'attention sélective, l'attention partagée et la vigilance.

1.2.1.2 Attention sélective

L'attention sélective ou dirigée désigne le processus mis en oeuvre lorsqu'un individu souhaite se focaliser sur une tâche ou une source d'informations, en limitant l'impact d'autres stimuli non pertinents. Elle permet en outre de résister aux interruptions et au bruit pour se concentrer sur le suivi d'une variable pertinente pour une tâche. L'enjeu est alors d'optimiser la performance d'une tâche, lorsque d'autres stimuli nous sollicitent.

Deux mécanismes sont sous-jacents à l'attention sélective et permettent d'orienter l'attention :

- le rehaussement qui favorise le traitement de l'information-cible ;
- l'inhibition des informations non pertinentes pour le sujet (les « distracteurs »).

Nous verrons également que cette sélection est, pour les théories du filtrage, au centre des processus attentionnels.

1.2.1.3 Attention partagée

Cette sélection a pour objectif d'accroître les ressources dédiées à une ou plusieurs tâches sur lesquelles le sujet souhaite se focaliser. Néanmoins, une autre notion est en jeu lorsqu'il s'agit non pas de privilégier une tâche mais de partager les ressources ainsi libérées entre des tâches ou des sources d'information. On parle alors de partage de l'attention. Ce phénomène est mis en jeu par exemple lorsqu'un conducteur doit assurer sa tâche de conduite tout en discutant avec un passager. Ce partage de l'attention peut s'effectuer entre plusieurs sources ou entre plusieurs tâches.

1.2.1.3.1 Attention partagée entre différentes sources

L'étude de ce type de phénomènes a débuté relativement tôt, par la prise de conscience de la difficulté de détecter la simultanéité de deux événements. La question s'est posée surtout dans le cadre des études expérimentales de la perception, menées selon divers courants théoriques (Gestalt théorie, béhaviorisme, néobéhaviorisme, puis cognitivisme).

Cette difficulté a notamment été étudiée par Moray (1969) qui a mis en évidence l'interférence résultant de cette simultanéité, qui empêche le sujet de percevoir les deux stimuli. Les causes dont dépend cette interférence ont été précisées par les travaux de Treisman et Davies (1973), qui ont établi par croisement entre stimuli de modalités semblables ou différentes (visuels - auditifs) que l'interférence, la difficulté de partage d'attention, était dépendante des modalités de présentation et de la similarité des stimuli sur ce plan.

La simultanéité absolue n'est pas indispensable pour mettre en évidence une interférence ; un écart temporel suffisamment faible des stimuli suffit à générer une perturbation, avec un degré croissant avec la proximité (Broadbent, 1954 ; Moray, 1960) et avec la difficulté d'identification de chaque stimulus.

Un point important pour l'évaluation de l'impact d'une interface sur l'attention est également la nécessité d'une évaluation globale. L'intrusion et la perception d'un élément ne doivent pas être considérées pour cet élément seul et agrégées aux autres ; une réelle étude des interactions est nécessaire, basée sur le risque de simultanéité et la différence des modalités, en termes de nature et de complexité.

1.2.1.3.2 Attention partagée entre différentes tâches

Les études de l'interférence entre sources d'information perçues ont été complétées par des études similaires de l'attention partagée entre tâches. La question première était de déterminer dans quelle mesure l'humain est à même d'effectuer simultanément plusieurs tâches, ainsi que la stratégie qui permet un tel fonctionnement : processus parallèles, répartition des ressources, processus sériels...

De même que pour les sources d'information, des interférences sont mises en évidence entre les tâches, dont il est intéressant de définir les causes.

Un protocole expérimental courant pour l'étude de ces phénomènes requiert le recours à deux tâches, une tâche primaire et une tâche additionnelle ou secondaire. Ainsi, Kalsbeek

et Sykes (1967) ont mis en concurrence une tâche principale de difficulté variable (réponse adaptée à deux stimulus) et une tâche secondaire de rédaction. On étudie dans ce cas les mesures de performance (voir plus bas) sur les deux tâches afin de déterminer la stratégie mise en place et son efficacité. De cette stratégie, l'objectif était de déterminer les contraintes imposées à l'humain.

Les études des interférences entre tâches ont permis de mettre en évidence leurs dépendances et l'importance des effets d'apprentissage amenant l'idée que l'automatisation d'une tâche facilite son traitement parallèle. Mais surtout, les nombreuses études sur le partage de l'attention entre des tâches ou entre des sources d'information ont permis d'élaborer des théories de l'attention, que nous présentons dans la partie suivante.

1.2.1.4 Vigilance

Une troisième problématique est souvent associée à l'attention : il s'agit de la vigilance qui est définie comme « une préparation à détecter et à répondre à certains changements spécifiques dans l'environnement, changement qui se produisent à des intervalles de temps irréguliers » (Mackworth, 1968). La vigilance fait référence aux situations où nous sommes obligés de maintenir un niveau d'attention pendant des périodes de temps prolongées, notamment lorsque les événements se font rares (Streri, 1993). La vigilance telle qu'on l'entend ici ne doit pas être confondue avec la notion habituelle de vigilance, au sens de niveau d'éveil.

De nombreuses expériences sont possibles pour mettre en jeu ce type de fonctionnement. L'une des plus connues est le test de l'horloge, élaboré par Mackworth (1970), dans lequel un sujet doit suivre la course d'une aiguille et détecter les moments où celle-ci se déplace du double de son pas habituel. Ce test visait à créer une situation de laboratoire imitant les conditions de surveillance de radar. La performance du sujet dans la détection de ces événements, rares et imprévisibles, suit généralement un profil générique, avec une diminution progressive sur le moyen/long terme. A la première demi-heure, le pourcentage de détection correctes est d'environ 83% , à la seconde demi-heure, de 73%. Après cette première baisse de 10%, la performance demeure stable pour les deux demi-heures

suivantes (73% et 72% environ).

1.2.1.5 Attention active et attention passive

Outre ces problématiques, deux types de mécanismes peuvent être identifiés lors des processus attentionnels. Ces derniers peuvent s'inscrire en top-down ou en bottom-up.

On entend par top-down les mécanismes par lesquels l'attention est dirigée, préparée. L'individu se prépare à un stimulus en concentrant son attention sur une source ou un objet. La focalisation de l'attention est active et endogène. On parle alors d'attention endogène ou active.

Cette attention s'inscrit dans une optique de préparation et nous amène de ce fait au concept de « conscience de la situation » développé par Endsley (1988). Ce dernier définit cette conscience comme « la perception des éléments dans l'environnement à l'intérieur d'un volume de temps et d'espace, à la compréhension de leur signification et à la projection de leur état dans le futur proche ». L'attention est focalisée, dans un mode top-down, en fonction de sa représentation mentale de la situation, et afin d'anticiper au mieux son évolution.

Par opposition, le terme bottom-up s'applique lorsque la focalisation de l'attention est passive et imposée par un stimulus extérieur. On parle d'attention exogène ou passive.

Cette opposition apparente cache de fait une complémentarité. Si l'attention endogène permet une focalisation de l'individu, l'attention exogène est la capacité de l'individu de prendre connaissance d'un élément en marge de son périmètre.

On peut illustrer le mécanisme par une analogie avec la perception visuelle. On sait notamment que la structure de la rétine permet de distinguer deux types de vision : la vision centrale, via une zone de la rétine nommée fovéa, est une vision détaillée, précise, mais suivant un angle restreint ; la vision périphérique en revanche embrasse une zone plus large mais avec beaucoup moins de détails. L'humain utilise de façon complémentaire ces deux zones : il focalise son regard (top-down) sur une zone de son champ de vision qui l'intéresse. Néanmoins, si un évènement survient hors de cette zone de focalisation, il en est informé et peut déplacer son regard sur la nouvelle zone intéressante (bottom-up).

1.2.2 Théories du filtrage et hypothèse du canal unique de traitement

1.2.2.1 La théorie du filtre de Broadbent

Qu'il s'agisse d'attention sélective ou de partage de l'attention, cette notion est généralement associée à l'idée d'une limitation des capacités de l'individu et, par conséquent, de la nécessité d'optimiser les moyens disponibles, au sens le plus large. Cette limitation se retrouve naturellement dans les premières théories de l'attention et notamment dans l'hypothèse du « canal unique de traitement ».

Le modèle sous-jacent suppose l'existence d'un goulet d'étranglement et la nécessité, pour éviter la surcharge de cette portion, d'un mécanisme de filtrage en amont. Ce modèle est au coeur de la théorie élaborée par Broadbent (1954; 1958). Sa théorie, communément nommée « théorie du canal unique », inspirée par la théorie de l'information développée par Shannon et Weaver (1949), considère que le système de traitement de l'humain se fait par un canal informationnel ne pouvant transmettre qu'un certain nombre d'informations par seconde (Richard, 1980). La capacité de traitement serait alors limitée.

Selon Welford (1967), le traitement de l'information dans ce canal serait sériel : « le traitement des signaux se fait de façon séquentielle dans l'ordre d'apparition des signaux. Si S2 (deuxième stimulus) survient avant que la réponse de S1 (premier stimulus) ne soit donnée, S2 est stocké provisoirement dans une sorte de mémoire-tampon et son traitement ne commence que lorsque le traitement de S1 est achevé, c'est-à-dire lorsque la réponse R1 est émise »(cité par Richard, 1980). En revanche, pour Broadbent (1971), le traitement d'informations en parallèle est possible mais uniquement dans les limites de la capacité du canal. Un filtrage serait ainsi opéré en amont du canal afin de limiter les surcharges. Que le traitement s'effectue de façon sérielle ou parallèle, « la théorie postule l'existence d'un canal unique de transit informationnel, entraînant une forte limitation structurelle du débit d'information en provenance du monde extérieur »(Amalberti, 1996).

1.2.2.2 Limites et améliorations de la théorie du filtre

Ce premier modèle s'est cependant heurté à certaines contradictions. Le point faible de cette théorie et des théories du filtrage de façon générale, est la position de ce filtre. Broadbent suppose en effet que le filtre est situé très en amont, bien avant toute analyse sémantique.

L'étude de ces mécanismes de filtrage et la mise en évidence de leurs limites, s'est en grande partie fondée sur des expériences d'écoute dichotique. On désigne par ce terme le paradigme expérimental dans lequel un sujet reçoit deux messages différents dans chacune de ses oreilles.

Ce paradigme a une grande utilité, notamment pour étudier les mécanismes d'attention. On peut en effet reproduire ainsi aussi bien des problématiques d'attention partagée (écoute et suivi des signaux sur les deux oreilles à la fois) ou des problématiques d'attention sélective (lorsque la consigne est de n'écouter que d'une oreille et d'ignorer les messages issus de l'autre oreille). De nombreux résultats ont été obtenus par ce biais.

Cherry (1953) a ainsi montré que le sujet retient très peu d'information sur le message ignoré : il ne remarque pas un changement de langue du message. En revanche, il détecte le passage d'une voix masculine à une voix féminine et inversement. Morey (1959) a pour sa part mis en évidence que le sujet remarque la mention de son nom dans le message transmis sur l'oreille ignorée.

Treisman (1960) a pour sa part testé une consigne particulière : elle a fait transmettre une phrase pour moitié sur l'oreille active et pour moitié sur l'oreille inactive. La phrase commençait d'un côté et s'achevait de l'autre. Les sujets avaient pour consigne de répéter le message de l'oreille active. Certains sujets continuaient cependant de répéter la phrase, en passant donc de l'oreille active à l'oreille inactive.

Ces résultats ont ainsi mis en évidence que le filtrage est influencé par des aspects sémantiques. Un filtrage en amont est donc insuffisant pour expliquer les mécanismes mis en jeu.

Treisman a ainsi proposé une alternative à ce filtre amont. Elle remplace ce filtre binaire par un atténuateur : les messages ne sont pas supprimés, mais simplement atténués.

Deutsch et Deutsch (1963) ont pour leur part proposé un filtre plus tardif : ils supposent que tous les messages sont traités jusqu'au niveau sémantique et ne sont filtrés qu'ensuite.

Néanmoins, ces différentes tentatives illustrent la difficulté à définir et à positionner le ou les filtres. Elles ont poussé certains auteurs à abandonner cette vision structurelle au profit de la notion plus large de ressources.

1.2.3 Ressources attentionnelles

1.2.3.1 Théorie du « réservoir unique de ressources »

Selon cette théorie, développée par Kahneman (1973), le système cognitif humain disposerait d'un réservoir de « ressources mentales », mais sa capacité serait également limitée. Dans ce modèle, tout comme dans celui de Broadbent, le système cognitif humain est limité quant à sa capacité de traitement de l'information : selon le premier modèle, cette capacité limitée serait due à une propriété structurelle du canal de traitement, alors que pour Kahneman, cette limitation serait due à une propriété fonctionnelle du réservoir de ressources.

Selon ce dernier modèle, contrairement à la théorie du canal unique, les ressources mentales peuvent être allouées à des tâches différentes et ainsi permettre le traitement simultané de plusieurs informations différentes. Si la difficulté d'une de ces tâches augmente, la variation observée de la performance dépendra de la priorité donnée à chacune de ces tâches. Il y aura, en effet, transfert de ressources des tâches non prioritaires vers celle qui est prioritaire, ce qui permet de conserver à cette dernière un niveau de performance identique malgré l'accroissement de la difficulté. Cependant, la capacité de traitement reste limitée : par conséquent, ce transfert ne peut se faire que dans la limite des ressources disponibles pour ces tâches.

1.2.3.2 Théorie des ressources multiples

Cette théorie postule l'existence de plusieurs réservoirs de ressources qui sont cependant toujours de capacités limitées (Wickens, Mountford et Schreiner, 1981). Ces différents réservoirs de ressources sont définis par le croisement de quatre facteurs : « les modalités

d'entrées (visuelle ou auditive), les modalités de sorties (verbale ou manuelle), les niveaux de traitement (encodage, traitement central, sélection des réponses) et les codes utilisés (verbaux ou spatiaux) ». Ce modèle apparaît dans le modèle du « cube » de Wickens (1984). « Le croisement de ces quatre facteurs qui sont représentés par quatre arêtes du cube déterminent des « cellules » qui définissent les réservoirs indépendants des ressources attentionnelles. Si le trajet cognitif de deux tâches différentes emprunte des « cellules » différentes (par exemple, une tâche A comportant une présentation visuelle d'un stimulus spatial conduisant à une décision exprimée par un appui manuel, exécutée simultanément avec une tâche B comprenant une présentation auditive d'un stimulus verbal conduisant à une décision verbalement exprimée), le modèle prédit une fonction de partage proche du point d'indépendance. En revanche, si les trajets cognitifs des deux tâches empruntent des « cellules » identiques, les réservoirs concernés ne peuvent pas assurer le traitement efficient des deux tâches et l'exécution de l'un s'effectue au détriment de l'autre (Camus, 1996).

1.2.4 Processus automatiques et processus contrôlés

Les deux hypothèses précédentes, canal unique ou réservoir, ont comme point commun l'idée d'une limitation et par conséquent d'une difficulté à exécuter différentes tâches en même temps. Néanmoins, elles ne décrivent pas de ce fait certains processus particuliers. De nombreux auteurs se sont en effet intéressés à des situations dans lesquelles des tâches n'interfèrent pas, comme si elles ne requéraient pas d'attention.

1.2.4.1 Existence de processus automatiques

La première mise en évidence des processus automatiques a été réalisée par Posner et Snyder en 1975. L'expérience utilisée consistait en une détection de couples de lettres identiques présentés au sujet. Les couples de lettres identiques (cible) ou distincts (distracteurs) étaient présentés aux sujets après une amorce. En faisant varier le type d'amorce et la probabilité d'occurrence d'une paire, ils ont mis en évidence deux types de fonctionnement, avec des temps de réaction associés nettement différents : un fonctionnement

conscient d'une part, et un fonctionnement automatique d'autre part.

Cette distinction a été par la suite étudiée en détail, notamment par les travaux de Norman et Bodrow (1975) et ceux de Schneider et Shiffrin (1977). Dans l'étude de Norman et Bodrow, les sujets étaient placés dans une situation de double tâche. Lorsqu'ils devaient travailler en parallèle sur les deux tâches, les performances étaient nettement moindres que celles obtenues dans des tâches isolées, sauf lorsque l'une des deux tâches était totalement automatisée par les savoir-faire du sujet. La performance dans la double tâche était alors identique à celle dans chacune des tâches isolée. A partir de ces résultats, Norman et Shallice (1980) ont proposé un modèle de traitement en parallèle selon lequel la consommation de ressources diminue lorsque les connaissances sont activées quasiment automatiquement et en parallèle et que l'attention contrôle uniquement la mise en route de ces schémas, la progression vers les buts et leurs retours en termes de résultats. Shiffrin et Schneider (1977) fournissent un autre cadre explicatif aux résultats de Norman et Bodrow selon lequel le traitement en parallèle est possible en considérant, d'une part, un traitement automatique pour les opérations réalisées souvent et répétitivement en mémoire à long terme et, d'autre part, un traitement contrôlé et sériel en mémoire à court terme portant sur les opérations les plus complexes nécessitant de l'attention pour éviter les interférences (Amalberti, 1996).

1.2.4.2 Détection automatique et attention contrôlée

Schneider et Shiffrin (1977) ont réalisé plusieurs expériences mettant en jeu l'attention et la mémoire. Celles-ci se fondaient sur des tâches de détection de cibles. Les sujets se voyaient présenter des planches et devaient indiquer si chacune des planches contenait ou non un des symboles à détecter. La difficulté était variable, soit par la taille des planches, soit par le nombre de symboles à repérer.

Dans une première expérience, deux consignes différentes étaient proposées :

- un mode « repérage stable » dans lequel les cibles étaient toujours des chiffres et les distracteurs des lettres ;
- un mode « repérage varié » dans lequel cibles et distracteurs étaient tous des lettres,

les cibles pouvant suivant les séries devenir des distracteurs et inversement.

Les résultats en termes de temps de réponse ont mis en évidence une nette différence entre les deux modes. En mode varié, le temps croît avec le nombre d'éléments distracteurs ou cibles. En mode stable, ce temps est rapidement optimal et n'est pas influencé par le nombre d'éléments à repérer.

On a donc deux types de fonctionnement : en mode varié, le processus est contrôlé, conscient et les temps de réponse croissent avec le nombre d'éléments. En mode stable cependant, le processus est automatique et met en évidence l'existence de processus rapides, beaucoup moins consommateurs pour l'attention.

Outre cette illustration de la dichotomie avancée par Posner et Snyder, Schneider et Schiffrin se sont aussi intéressés à la façon dont les processus automatisés peuvent apparaître. Ils ont ainsi mené d'autres expériences suivant un fonctionnement légèrement différent :

- en mode « repérage varié » cibles et distracteurs étaient tous des lettres, les cibles pouvant suivant les séries devenir des distracteurs et inversement.
- en mode « repérage stable », les cibles étaient aussi des lettres mais toujours distinctes de celles utilisées pour les distracteurs.

Dans cette seconde série de mesures, le fonctionnement en mode stable a montré une évolution des temps de réponse différente : si les deux modes ont au départ des résultats proches, les performances en mode stable s'améliorent progressivement. On se rapproche de plus en plus du processus automatique, comme si les sujets intégraient le processus de détection des cibles. Cette automatisation est corroborée non seulement par les temps de réponse mais aussi par l'impression subjective des sujets que les lettres-cibles finissent par leur « sauter aux yeux » au point de gêner par la suite leur lecture.

Du point de vue de ces auteurs, on met ainsi en avant non seulement l'existence de processus automatisés mais aussi la possibilité pour le sujet d'automatiser certains processus, afin de faciliter d'accélérer leur exécution.

1.2.4.3 Modèle de l'intégration des traits

Au-delà de l'automatisation des processus, il restait à ce stade un certain nombre d'inconnues. En particulier, la distinction entre processus automatisés et contrôlés implique une différence dans leur traitement. Treisman et Gelade (1980), dans leurs travaux sur l'intégration des traits, ont tenté d'apporter des réponses sur cette distinction.

Ces deux auteurs mettent en avant l'idée que l'attention met en jeu un assemblage, une intégration des attributs ou des traits. On entend par là une caractéristique unidimensionnelle d'un objet (forme, couleur, ...).

Ce mécanisme a été étudié via des tâches de reconnaissance de lettres colorées : les sujets devaient retrouver dans des planches des symboles ayant une forme et/ou une couleur distincte. Deux modes étaient utilisés :

- en mode conjonctif, les sujets devaient détecter des symboles ayant une couleur et une forme particulières ;
- en mode disjonctif, les sujets devaient détecter des symboles ayant une couleur ou une forme particulières.

Les résultats en termes de temps de réponse ont montré une nette différence entre ces deux modes. De façon générale, le mode conjonctif met en évidence un processus contrôlé alors que le mode disjonctif offre un profil plus proche du processus automatique, avec notamment une indépendance par rapport au nombre de distracteurs.

Les auteurs en déduisent un modèle à deux niveaux : lors d'une première étape s'effectue la détection des attributs ; lors d'une seconde, ces attributs sont éventuellement assemblés. La première étape est rapide et automatique, alors que la seconde est limitante. Ils expliquent ainsi les différences de performance suivant que les sujets doivent ou non associer les attributs.

1.2.5 Conclusion sur les théories de l'attention

Nous terminerons cette revue en soulignant deux points complémentaires.

Tout d'abord, la distinction entre théories des filtrages et théories des ressources ne doit pas être vue comme une opposition complète. Si ces deux approches se succèdent,

et si la seconde est en partie fondée sur une tentative d'échapper aux limitations de la première, il est aussi possible d'établir des liens entre l'une et l'autre.

La théorie des filtres est en partie liée à l'application à l'humain d'une analogie informatique. Cependant, on sait aujourd'hui concevoir des ordinateurs à même, via un canal unique de traitement (le microprocesseur), de traiter plusieurs tâches simultanément. Chacune d'entre elles est simplement traitée durant un laps de temps, le processeur passant rapidement d'une tâche à l'autre, ce qui donne l'illusion de la simultanéité. Ce multiplexage réconcilie ainsi la séquentialité et le partage de ressources.

Appliqué à l'humain, ce modèle sous-tend l'idée que le canal unique disponible pour l'humain pourrait être adapté malgré tout au partage d'attention, pour peu qu'on suppose qu'il lui soit possible de partager son temps entre les différentes tâches et de commuter de l'une à l'autre à une fréquence suffisamment élevée ; ce partage en temps s'accompagnerait de la mise en oeuvre de mécanismes de files d'attente dans lesquelles la mémoire sensorielle serait sollicitée pour stocker et récupérer les informations antérieures au fur et à mesure des commutations.

Outre cette première nuance, il nous semble important de souligner la rupture que constitue la mise en évidence des processus automatisés et surtout la possibilité d'automatiser un processus par la pratique.

Pour réutiliser le paradigme informatique, on touche ici une notion qui différencie encore aujourd'hui l'humain des ordinateurs : la capacité à optimiser son fonctionnement pour s'adapter à son environnement. L'humain est ainsi à même d'intégrer un comportement dont l'expérience montre la criticité. Mais surtout cette automatisation n'interdit pas le retour arrière (et en cela le terme d'« automatisme » n'est pas totalement approprié) : malgré ce processus automatisé, l'humain reste à même de traiter des stimuli périphériques et de ne pas appliquer le processus câblé, lorsque ce dernier ne se révèle pas pertinent.

Ce lien entre expertise et mise en place de processus automatisés a été notamment étudié par Rasmussen (1986) et Anderson (1985).

Ainsi Rasmussen définit une classification « Skill-Rule-Knowledge (SRK) » dans la-

quelle il distingue :

- les activités basées sur les habitudes, avec un très faible contrôle attentionnel ;
- les activités basées sur les règles, avec un contrôle attentionnel variable mais souvent réduit ;
- les activités basées sur l'ensemble des connaissances et des modèles du sujet, marquées par une certaine lenteur et une forte consommation de ressources.

La montée en compétences et en expertise d'un individu s'accompagne généralement d'une redistribution des activités suivant ces trois catégories, les deux premières étant plus présentes chez un expert, et moins accessibles pour un débutant.

De même, Anderson définit trois stades, cognitif, associatif et autonome, pour l'acquisition de l'expertise, le dernier n'étant lui aussi accessible qu'à l'expert.

1.2.6 Cas de la conduite automobile

Comme nous l'avons vu précédemment, la tâche principale du conducteur, qui consiste à effectuer un déplacement dans un environnement en perpétuelle évolution (Neboit, 1980), est à elle seule consommatrice de ressources attentionnelles. Elle nécessite plus ou moins simultanément la réalisation de nombreuses sous-tâches. Certaines, comme les actions sur les pédales ou le volant (les tâches de niveau I¹) sont automatisées et peuvent être réalisées en parallèle. D'autres en revanche, nécessitent une attention accrue comme la consultation d'un panneau indicateur (tâche de niveau III) ou la gestion d'un obstacle soudain sur la voie (tâche de niveau II). Le conducteur doit en permanence allouer des ressources cognitives aux différentes tâches qu'il a à accomplir, selon leur niveau de priorité.

Par ailleurs, si l'on considère comme Parkes (1991) que la tâche primaire du conducteur est le contrôle du véhicule dans le trafic, alors toutes les autres tâches sont considérées comme des tâches secondaires. Ainsi, les consultations d'informations présentes dans le véhicule comme le tachymètre, un témoin du tableau de bord, ou d'une carte routière, seront considérées comme des tâches secondaires, même si elles sont nécessaires à la réalisation de la tâche principale. Selon Heintz, Haller et Bouis (1982), la consultation d'une inter-

¹Tâches de niveaux I, II et III définies par Allen et al (1971) (voir tableau 1.1 page 5)

face dans la voiture est toujours une tâche secondaire. Cette interface doit d'ailleurs être évaluée en fonction du degré avec lequel elle distrait le conducteur de sa tâche principale, c'est-à-dire la stabilisation, le contrôle du véhicule et la navigation.

De même, Zwahlen et De Bald (1986) mettent en garde contre l'utilisation d'interfaces visuelles complexes dans les voitures car elles risquent de détourner l'attention du conducteur de la route pendant des périodes trop longues pour être compatibles avec une conduite sûre.

Outre la consultation d'interfaces présentes dans le véhicules, nous savons que le conducteur réalise fréquemment des tâches annexes durant son activité de conduite : il converse avec les passagers, écoute la radio, pense à sa journée, regarde des panneaux publicitaires, etc.

L'activité de conduite est bien une activité complexe où de nombreuses tâches interagissent. Or, rien ne définit de façon opérationnelle comment le conducteur doit s'adapter aux différentes situations qu'il rencontre dans le cadre de son activité (Van Eslande et Luber, 1990). Le conducteur apprend à réagir dans les situations « courantes » de conduite, mais il doit surtout être capable de s'adapter rapidement aux nouvelles situations auxquelles il est confronté. Les délais dont il dispose pour réagir adéquatement sont courts (de l'ordre de la seconde) a dans le cadre d'une conduite automobile, dont on ne saurait trop souligner le caractère risqué.

En outre, avec l'essor de l'électronique embarquée, le conducteur dispose d'informations de plus en plus diverses sur son véhicule et son environnement, sans parler de la « possibilité » de téléphoner en conduisant. Notre étude portant sur les systèmes d'aide introduits dans le véhicule, nous ne rentrerons pas dans la description des effets des téléphones portables sur la conduite automobile. Cependant, c'est un bon exemple de distraction importante du conducteur, distraction que les systèmes d'aide, eux, ne devront évidemment pas provoquer.

Ainsi, il est fondamental que les dispositifs d'aide à la conduite mis à la disposition des conducteurs automobiles prennent en compte les différentes contraintes associées à la tâche de conduite. Outre le fait que l'apprentissage de leur utilisation et leur utilisation doivent

être les plus rapides et faciles possibles, il est absolument nécessaire que les informations fournies au conducteur par ces systèmes d'aides ne deviennent pas des sources de danger et respectent la priorité des exigences de la tâche de conduite. Lorsqu'un système d'aide fournit une information au conducteur, ce dernier devra traiter cette nouvelle information tout en continuant à gérer les autres informations nécessaires à sa tâche de conduite. Par ailleurs, l'accumulation de nouveaux dispositifs dans le véhicule risque de distraire le conducteur de sa tâche principale qui reste, bien entendu, la conduite de son véhicule. Les différentes informations des systèmes sont susceptibles d'être présentées simultanément au conducteur, selon différentes modalités sensorielles (vision, audition, toucher, kinesthésie). Ces différentes technologies peuvent interagir et risquent parfois d'être en compétition pour attirer l'attention du conducteur. Cela peut évidemment avoir des effets désastreux.

L'introduction de nouveaux systèmes d'aide accroît la nécessité de partager les ressources attentionnelles, entre différentes sources d'information (visuelles, auditives, intérieur / extérieur du véhicule, etc.) et entre différentes tâches (maintenir le véhicule dans sa voie tout en « dialoguant » avec le système d'aide). Les capacités humaines de perception et de traitement de l'information devront être intégrées dans la conception et l'évaluation de ces systèmes. Ainsi, pour augmenter la sécurité, l'efficacité et le confort par le biais de nouveaux systèmes d'aide, sans créer de nouveaux risques pour les conducteurs ou les autres usagers, il faut partir de l'analyse des besoins et des contraintes des conducteurs.

1.3 Besoins des conducteurs et systèmes d'aide à la conduite automobile

1.3.1 Limites et besoins des conducteurs

1.3.1.1 Limites des conducteurs

Durant des millions d'années, l'humain se déplaçait dans son environnement, sans aucune technologie, en mettant un pied devant l'autre, le plus souvent de jour, à faible vitesse. Ses caractéristiques physiques et psychologiques étaient adaptées à ce mode de

déplacement (bonne vision de jour, mauvaise de nuit, capacité importante pour analyser et structurer des stimuli visuels compliqués en une fraction de seconde, etc.). Il était en interaction directe avec l'environnement et avait ainsi un feed-back permanent, ce qui lui permettait de connaître immédiatement l'effet de ses actions sur l'environnement et sur lui-même. Une erreur de jugement, d'appréciation, durant la marche était immédiatement sanctionnée. Par ailleurs, la compréhension des informations fournies par l'environnement était « naturelle ». En revanche, à l'intérieur d'un véhicule, le feed-back n'est pas forcément immédiat et surtout, il existe désormais un intermédiaire entre l'humain et l'environnement. On parlera d'ailleurs d'interactions Homme - Véhicule ou Système - Environnement. Une source d'informations intermédiaire est devenue nécessaire pour indiquer au conducteur l'état et les effets de son interaction avec l'environnement. Par exemple, la connaissance de la vitesse de déplacement dans un véhicule nécessite la présence d'un tachymètre. Il est très difficile d'évaluer la vitesse de déplacement dans l'environnement car les sensations sont différentes d'un véhicule à un autre et dépendent des caractéristiques de l'environnement (route étroite versus autoroute, etc.). Notons à ce sujet que la diminution croissante du bruit et des vibrations à l'intérieur des véhicules modernes réduit considérablement les capacités des conducteurs à évaluer la vitesse de leur véhicule. L'amélioration du confort se fait parfois au détriment de la sécurité. Pour pallier les difficultés du conducteur à évaluer sa vitesse, des systèmes techniques sont développés pour lui fournir cette information. Cet exemple illustre la nécessité d'introduire un intermédiaire entre l'humain et son environnement, afin de faciliter leur interaction. Les interfaces ainsi développées doivent être conçues en prenant en compte les limites de l'humain pour d'une part être adaptées à ce dernier et d'autre part essayer de pallier ses limites. Selon Rumar (1993), les limites du conducteur sont de trois ordres : physiologiques, psychologiques et sociologiques.

1.3.1.1.1 Les limites physiologiques

Ces limites concernent les caractéristiques physiologiques de l'humain. Appliquées au domaine de la conduite, on peut retenir par exemple une perception visuelle amoindrie en conduite de nuit, une perception inadaptée de la vitesse, une vision périphérique dégradée,

une diminution du champ visuel avec la vitesse, etc. Cependant, dans certaines conditions, la perception de l'humain est beaucoup plus performante que celle réalisée par les capteurs d'un système technique. Par exemple, le champ visuel humain est beaucoup plus large que celui d'un radar. En revanche, de nuit ou dans le brouillard, le capteur du système sera certainement plus performant que l'humain. Il s'agit bien d'aider l'humain à percevoir et non de se substituer à lui. Les systèmes d'aide doivent ainsi être complémentaires des capacités de l'humain.

1.3.1.1.2 Les limites psychologiques

La conduite automobile est une situation d'auto-apprentissage particulière. Le conducteur va, en effet, acquérir dans la pratique, notamment par le biais d'essais et d'erreurs, des aptitudes nécessaires à une conduite adaptée. Cependant, si la pratique de la conduite permet un auto-apprentissage certain, les erreurs ne sont pas systématiquement sanctionnées. Certains conducteurs peuvent avoir des comportements inadaptés toute leur vie et ne pas le savoir car les conséquences de ces comportements n'apparaissent pas toujours immédiatement. Les conducteurs ne peuvent évaluer la pertinence de tous leurs comportements durant la conduite ; des habitudes, des attentes, des comportements inadaptés peuvent être établis et jugés comme adaptés puisque aucun feed-back négatif n'a été jusqu'alors provoqué par ces « mauvaises habitudes ». Par exemple, de nombreux conducteurs roulent trop près du véhicule précédent et ne pourraient éviter la collision en cas de freinage soudain de ce dernier. Mais, comme cette situation d'urgence ne s'est encore jamais produite, ils n'ont pas conscience que leur comportement est inadapté.

L'humain a une capacité limitée pour traiter de nombreuses informations complexes sous forte pression temporelle. Par exemple, les conducteurs peuvent trouver délicate la gestion des intersections en ville, vu tous les éléments qu'elles peuvent comporter : panneaux, feux, véhicules divers, vélo, piétons, etc. Dans ce type de situation, le conducteur ne peut traiter toutes les informations à la fois, il se concentre alors sur certaines d'entre elles, mais parfois, cette focalisation de l'attention ne se fait pas sur les informations les plus pertinentes et des accidents surviennent.

1.3.1.1.3 Les limites sociologiques

La communication et l'interaction entre les différents conducteurs peuvent être extrêmement différentes de la communication et l'interaction entre des humains, en dehors d'un véhicule. Si on compare le comportement des gens dans la rue ou dans un magasin et leurs comportements en voiture, on constate des modifications assez importantes, notamment en ce qui concerne l'agressivité. Lorsque nous faisons la queue à une caisse de supermarché, nous ne poussons pas les gens devant nous, nous ne les collons pas, nous ne nous insérons pas brusquement... c'est courant en voiture. De plus, il n'y a pas de signal « Excusez-moi » dans une voiture. Une des caractéristiques de la conduite automobile est que le conducteur est isolé du reste de l'environnement, il est dans une sorte de bulle, anonyme, coupé du monde social et de toutes les règles qui régissent ordinairement la vie en société. Les pouvoirs publics en sont même venus à organiser une « journée de la courtoisie », afin d'essayer de rendre ces usagers plus sociables... au moins une journée par an. Certains constructeurs automobiles ont, quant à eux, proposé des concept-cars pouvant exprimer une émotion ².

Par ailleurs, les conducteurs n'assument pas pleinement leurs responsabilités en cas d'infractions et chez la plupart des personnes, transgresser le code de la route n'est pas jugé comme étant quelque chose de grave et est même souvent admis, notamment dans les pays latins. Par exemple, en France, il est courant de voir des conducteurs se prévenir les uns les autres lorsque les forces de l'ordre exercent des contrôles routiers. Rumar rapporte que sur une échelle subjective de criminalité, les infractions au code de la route sont jugées très peu graves.

Notons cependant que cette conduite « agressive » et cette tolérance vis-à-vis des infractions au code de la route ne sont pas universelles et dépendent de la culture des pays et de la personnalité initiale des conducteurs. La conduite automobile ne crée pas l'agressivité mais elle lui permet de se manifester sous forme de comportements. Elle exacerbe en effet certaines tendances agressives qui peuvent s'exercer d'autant mieux que les barrières sociales du conducteur sont amoindries en situation de conduite.

²« The Pod » : le « concept-car », présenté par Sony et Toyota au Salon de l'automobile de Tokyo (2001), a été conçu pour capter les émotions du conducteur.

Dans ces trois domaines, une utilisation appropriée des nouvelles technologies d'information pourrait compenser les limites de l'humain. Ces technologies ont un large potentiel pour « rationaliser » les transports routiers en prédisant le trafic, en le fluidifiant... Dans le domaine de la sécurité, elles permettent par exemple :

- d'améliorer les caractéristiques des véhicules comme le freinage, la stabilité, les airbags, etc...
- une vision électronique (détection, reconnaissance) dans des conditions de faible luminosité (brouillard, nuit, ...);
- une aide au maintien des distances de sécurité par rapport au véhicule précédent afin de limiter les chocs fronto-arrières;
- une aide au maintien dans la voie;
- des systèmes anti-collision, des aides au maintien de la vitesse, des aides au dépassement, etc...

Ces systèmes d'aide sont en plein essor. En les introduisant dans les véhicules, les constructeurs et les chercheurs espèrent pallier certaines défaillances des conducteurs et améliorer la sécurité. Les études de nombreux accidents de la route indiquent que le maintien de la distance par rapport au véhicule précédent, ainsi que les intersections et les dépassements sont les principales situations posant des problèmes au conducteur. En outre, dans le cas des collisions fronto-arrières, 90% des accidents auraient été évités si le conducteur avait réagi une seconde plus tôt (Gerhardt, 1993). Les conducteurs et les facteurs humains de façon plus générale, sont souvent un facteur critique dans la survenue d'accidents (Parkes et Ross, 1991). La perception tardive d'obstacle, la mauvaise évaluation des distances de sécurité durant la conduite, les réactions inappropriées dans une situation de conduite inattendue (ex : variation brutale de la fluidité du trafic) sont généralement classées comme « défaillances humaines », comme manque de vigilance ou d'attention (Emberger, 1993). Les technologies actuelles (capteurs, processeurs, etc.) offrent la possibilité d'assister le conducteur dans les situations critiques. Dans le but d'augmenter la « fiabilité humaine », de nouveaux systèmes techniques sont alors mis au point pour

améliorer la perception, la planification et les capacités de réaction du conducteur. Ainsi, ces nouveaux systèmes peuvent fournir des informations de meilleure qualité qui seront d'autant plus efficaces qu'elles seront adaptées à la tâche en cours. L'augmentation de la performance du conducteur, grâce à la présence d'un système d'aide, est influencée par le contenu, le mode de présentation des informations et le moment où ces informations sont présentées. L'information doit être d'une part réellement nécessaire et d'autre part diffusée au bon moment. Elle doit être présentée de la façon la plus facilement perceptible et doit être facilement comprise. De plus, elle doit être compatible avec les différentes étapes du traitement de l'information, les représentations mentales et les attentes du conducteur (Gerhardt, 1993).

Une des exigences minimales à respecter concernant l'introduction de ces systèmes d'aide dans les véhicules est de rester dans les limites des ressources perceptives et cognitives acceptables pour le conducteur. Dans la mesure où il n'est pas souhaitable de fournir une grande quantité de messages, il est essentiel de savoir quelles sont les informations pertinentes dont le conducteur a besoin pour conduire plus sûrement. Et pour maximiser l'impact sécuritaire des informations fournies, il convient de déterminer quels types de perturbations pourraient intervenir dans la détection et le traitement de ces informations par le conducteur en situation.

C'est pourquoi, dans une logique de conception, le questionnement de certains accidentologues, dont Van Elslande et Nachtergaele (1992), porte sur la capacité qu'aura un conducteur à percevoir et utiliser de façon optimale les informations fournies par les systèmes d'aide, étant donné le grand nombre d'informations traitées par ailleurs au cours de la conduite et les contraintes d'attention qu'elle exige.

1.3.1.2 Apport de l'accidentologie automobile

1.3.1.2.1 Définition de l'accidentologie

L'accidentologie est l'étude scientifique des accidents réels. Deux approches existent et se complètent : l'accidentologie statistique et l'étude détaillée des accidents. Alors que la première démarche repose sur une analyse statistique de l'ensemble des accidents de

la route afin de définir des macro-enjeux, la seconde consiste en une analyse détaillée de chaque accident. Celle-ci porte sur trois composantes du système routier : le conducteur, le véhicule, la route et son environnement. L'analyse des accidents se fait généralement par des équipes pluridisciplinaires : spécialistes de la route et du véhicule, psychologues, etc. Le but de ces analyses est bien entendu de mettre à jour les causes et les circonstances de l'accident, ainsi que ses conséquences (matérielles et corporelles). L'objectif est de connaître les situations d'accidents pour définir les systèmes de sécurité à mettre en œuvre.

1.3.1.2.2 Apports de l'étude détaillée des accidents à la spécification des aides à la conduite

La démarche repose sur la logique suivante : « dans les mécanismes de production d'un accident, on constate souvent une ou plusieurs défaillances fonctionnelles (perceptives, interprétatives, etc.) de la part d'un usager. En amont de ces défaillances, on cherche à identifier un certain nombre d'éléments précurseurs (facteurs humains) qui en ont favorisé l'émergence. Parmi ces éléments initiateurs de l'accident, certains ont affecté, de fait, la détection ou le traitement des informations présentes dans la situation-problème rencontrée. On peut par conséquent émettre l'hypothèse qu'ils puissent intervenir de la même manière vis à vis d'une information dispensée par un dispositif d'aide qui ne tiendrait pas suffisamment compte, dans sa conception, du fonctionnement effectif de l'opérateur humain. »(Van Elslande et Nachtergaele, 1992).

Ces auteurs ont réalisé une étude approfondie des défaillances trouvées auprès de 126 conducteurs accidentés, sélectionnés dans la banque détaillée d'accidents de Salon de Provence, leur objectif étant d'identifier les éléments initiateurs d'accidents, propres à l'usager, qui seraient susceptibles de limiter la prise en compte des informations fournies par des systèmes d'aide embarqués. Ils ont d'une part décrit les scénarios de conduite dans lesquels les conducteurs ont rencontré une difficulté pouvant être compensée par un dispositif d'aide, ainsi que les éléments initiateurs de ces difficultés. D'autre part, ils rendent compte des influences négatives des éléments initiateurs d'accidents sur le traitement des situations-problèmes rencontrées et de leurs répercussions possibles sur la prise en compte des informations fournies par les systèmes. Ces limitations peuvent être en dehors du contrôle du conducteur (négligence involontaire de l'information), dans les cas où

les ressources psychophysiologiques ou attentionnelles du conducteur ne lui permettaient pas de détecter l'information ajoutée ou d'y réagir de manière adaptée (exemples : vigilance réduite, capacité perturbée, faible attention, distraction, focalisation, etc.). D'autres limitations peuvent aussi intervenir sous le contrôle du conducteur (rejet plus ou moins volontaire) dans les cas où l'aide entrerait en opposition avec les motivations (prise de risques volontaire), les jugements et les attentes élaborés par le conducteur.

Ils aboutissent à la fin de leur étude à des suggestions pour la conception de systèmes d'aide adaptés aux modes de fonctionnement des usagers et à leurs limites.

Nous voyons dans ce type d'étude l'apport essentiel de telles informations pour la conception des futurs systèmes d'aide. L'étude des accidents peut nous éclairer sur les types de systèmes d'aide à développer, mais aussi nous permettre d'intégrer dès leur conception les modes de fonctionnement des futurs usagers. Nous allons dans un premier temps présenter brièvement leurs résultats concernant les besoins des conducteurs, puis voir les spécifications concernant les systèmes d'aide.

1.3.1.2.2.1 Principaux besoins mis en évidence par l'étude des 126 cas d'accidents

- besoin en détection d'un obstacle ou d'un autre usager (46 cas) ;
- besoin du conducteur en évaluation et estimation de ses interactions avec la route ou les autres usagers (37 cas) ;
- besoin du conducteur en prévision sur l'évolution d'une interaction avec un autre usager (23 cas) ;
- besoin d'aide à la maîtrise de son véhicule (10 cas) ;
- besoin en information du conducteur sur son état (10 cas) ;
- besoin en information du conducteur sur l'état de son véhicule (10 cas) ;
- besoin en information du conducteur sur certaines difficultés de la route (10 cas).

1.3.1.2.2.2 Spécifications issues de l'étude détaillée des accidents pour des aides adaptées

Van Elslande et Nachtergaele (1992) ont élaboré les spécifications suivantes :

- **Pour une meilleure détection des informations :** la prise en compte d'une information dépendra directement de sa détectabilité. « Pour tenir compte des problèmes d'ordre perceptif (...), les messages fournis par les dispositifs ne devraient pas se limiter à un canal unique de transmission de l'information. L'utilisation du seul canal visuel, par exemple, ne sera pas suffisante dans certains cas pour permettre la perception des messages. L'utilisation couplée de ce canal avec d'autres (sonore...), serait un moyen d'améliorer la détectabilité des informations les plus cruciales pour la sécurité. Toutefois, l'objectif n'est évidemment pas de surcharger le conducteur par une avalanche de messages, mais de pouvoir attirer son attention vers les informations essentielles à prendre en compte pour la réalisation sécuritaire de la tâche de conduite »
- **Pour la définition d'une aide au diagnostic :** certains accidents sont le résultat de l'élaboration par les usagers de diagnostics erronés ou trop tardifs. « La difficulté rencontrée par ces usagers réside dans l'intégration, l'identification et l'interprétation rapide et adéquate de l'ensemble des indices pertinents pour la réalisation d'un diagnostic conforme à la situation et à ses évolutions possibles. Cependant, chaque système ne rend compte que d'un aspect partiel de la situation. Or, dans cette phase délicate, il ne s'agit pas que de multiples systèmes d'aide interviennent plus ou moins simultanément dans la tâche déjà difficile pour l'utilisateur. L'effet de surcharge qui pourrait résulter d'une profusion de messages, perturberait très certainement la prise en compte de informations transmises. »
- **Pour une intégration optimale des informations à la tâche de conduite :** l'utilisation optimale des systèmes d'aide dépendra également du moment d'intervention de ces aides et du mode de présentation des messages. « Ces messages devront être délivrés le plus tôt possible par rapport aux problèmes identifiés par les systèmes, d'une part pour un simple motif de temps de réponse de l'utilisateur et d'autre part, pour prévenir, dans certains cas, l'élaboration de diagnostics erronés qu'il sera plus difficile et plus long de remettre en question par la suite ». La fiabilité des systèmes, mais aussi la simplicité de compréhension, la crédibilité et le pouvoir

de persuasion des messages transmis seront également garants d'une meilleure utilisation des systèmes d'aide.

- **Pour une réaction appropriée des conducteurs aux informations transmises** : « la réalisation par le conducteur d'une action appropriée au message présenté par l'aide dépendra ainsi de la capacité des dispositifs à rendre compte efficacement et en temps utile des dangers potentiels contenus dans la situation ». Il faut également faire attention au type de réaction que peut induire une intervention trop soudaine et brutale d'un système d'aide chez certains conducteurs. « On sait par l'analyse des mécanismes d'accidents que des usagers confrontés soudainement à une information inattendue peuvent, sous l'influence de l'effet de surprise et de la peur induite, réagir de manière incontrôlée (coup de volant ou freinage intempestif) ou ne pas réagir du tout (sidération). Il est alors important que dès leur conception, les systèmes d'aide ne puissent provoquer de tels effets. »

1.3.2 Classification des différents systèmes d'aide

Les nouvelles technologies offrent une multitude de systèmes d'aide possibles visant à répondre à divers besoins des conducteurs. Une présentation exhaustive de ces systèmes n'est pas l'objet de notre étude mais nous présentons ici différentes classifications des principaux systèmes existants. Plusieurs classifications existent et la répartition des tâches entre le système et le conducteur ainsi que leurs degrés d'interaction sont souvent des critères de classification (Dessaigne, 2002)

1.3.2.1 Typologie des systèmes d'aide, selon Bellet, Tattégren-Veste et Chapon (2001)

Bellet, Tattégren-Veste et Chapon, (2001) distinguent les systèmes d'informations, les systèmes d'alerte, les systèmes coopératifs et les systèmes de conduite automatique. Cette classification ne considère pas uniquement les systèmes d'aide qui existent, mais intègre les évolutions futures de ces systèmes, qui pourront parfois agir « à la place » du conducteur. Ces auteurs classent les systèmes en fonction de la chronologie de leur évolution, ainsi que

l'implication de cette évolution en termes d'exigences ergonomiques.

1.3.2.1.1 Les systèmes d'information

Le plus courant de ces systèmes est le système d'aide à la navigation (qui guide le conducteur tout au long de son trajet, via une carte ou une synthèse vocale). Ce système prend en charge partiellement ou totalement le niveau stratégique de la conduite qui consiste à planifier un itinéraire, à suivre une direction, un trajet, etc. (Michon, 1985). Cependant, ces systèmes nécessitent une action du conducteur qui doit fournir différents paramètres tels que sa destination, ses préférences et doit activer ou non le système. Les systèmes d'information trafic ou les aides de proximité sont également classés dans les systèmes d'information. Ces derniers fournissent différentes informations au conducteur durant sa conduite et peuvent alors modifier la tâche de conduite, car ils deviennent une nouvelle source d'information. Il faut s'interroger sur la fonction (type d'informations fournies) et le rendu (modalité de diffusion ou d'accès à l'information) de ces systèmes. Ils nécessitent une optimisation de l'ergonomie des commandes, des restitutions et des dialogues interactifs.

1.3.2.1.2 Les systèmes d'alerte

Ils sont caractérisés par l'absence de demande d'information de la part du conducteur. Ces systèmes se déclenchent lorsqu'un danger possible est détecté dans l'environnement. Selon leur degré « d'intelligence », ils peuvent alerter par rapport à un simple niveau de fonction (ex : vitesse supérieure à une vitesse de consigne) ou par une analyse plus fine de la situation (ex : arrivée trop rapide sur un obstacle). Le premier exemple correspond à un limiteur de vitesse (ou système anti-dépassement de vitesse), le second à un système anti-collision. Ce type de système ne doit en aucun cas provoquer des réactions inadaptées chez le conducteur et leurs interfaces doivent être adaptées à la situation rencontrée. La fiabilité du système, l'absence de fausses alertes, les interfaces adaptées (quelles modalités sensorielles utiliser pour transmettre l'information ?) sont des critères essentiels pour un « bon » fonctionnement de tels systèmes. Rappelons qu'il est indispensable que le système ne soit pas une source de danger supplémentaire.

1.3.2.1.3 Les systèmes de conduite coopérative

Les auteurs précisent qu'ils relèvent encore de la prospective dans le contexte routier, contrairement à d'autres secteurs où ils sont mieux développés. Si leur développement se réalise, ils seront alors de véritables copilotes intelligents, ce qui n'est pas le cas à ce jour. Une logique de coopération dite « pure », où le partage des tâches serait évident entre l'homme et la machine n'existe pas actuellement : on ne voit pas encore de copilote prendre le pas sur l'homme, ni interpréter ses intentions. Pour y parvenir, il faudrait un système doté de connaissances et de capacités de raisonnement approchant celles de l'humain, aussi bien sur les actions à entreprendre que sur l'environnement. Il faudrait un sérieux effort de recherche sur le conducteur et la mise au point de modèles computationnels.

1.3.2.1.4 Les systèmes de conduite automatique

Théoriquement, le conducteur ne serait plus dans la boucle et le système assurerait seul le contrôle longitudinal et transversal du véhicule. Cependant, ces systèmes concernent un futur plus lointain, puisqu'ils nécessitent d'importants aménagements de l'infrastructure routière et la réalisation de systèmes embarqués. Il semble plus que probable que le conducteur ne serait pas totalement absent de la boucle, ne serait-ce que pour assumer les reprises en main en cas de dysfonctionnement et les transitions si toutes les voies ne sont pas équipées.

1.3.2.2 Typologie des systèmes d'aide, selon Dessaigne, Gabaude, Specht, Fouet, Kaplan et Kaplan (1996)

Dessaigne et al. (1996) proposent une classification, cherchant à établir un répertoire des technologies utilisées :

« Un premier type d'assistance à la conduite est composé d'aides dites « informatives » intégrées dans les véhicules. Celles-ci permettent de donner à l'opérateur des informations quant à sa tâche, parfois sous une forme procédurale, notamment dans le cas des systèmes d'information routière où l'individu choisit de l'utiliser ou non. En conduite automobile, sont regroupées dans cette typologie des systèmes d'information sur les conditions de circulation et certains systèmes d'aide à la navigation (...)

Un deuxième type d'assistance à la conduite est composé de systèmes d'alerte. Ce sont des systèmes installés à bord des véhicules : affichages d'informations routières, mais également alarmes de différents modèles. Il s'agit également d'aides de la catégorie « assistance informative » même si, au premier abord, elles participent au déclenchement de l'activité du conducteur. Une information, éventuellement d'alerte, est donnée, mais le système ne va pas pour autant proposer des actions ou agir à la place de l'opérateur. Certains auteurs appellent les systèmes d'alerte des copilotes passifs.

Un troisième type d'aide à la conduite est constitué par des systèmes de copilotage « actifs » permettant également le contrôle des véhicules. Ce sont des automates qui réalisent à la place de l'opérateur tout ou une partie des tâches à réaliser. Ce sont plutôt des systèmes que l'on peut qualifier de « substitutifs(...) »

Un quatrième type d'assistance à la conduite est constitué par les « copilotes intelligents ». Ils prennent en charge tout ou partie d'une tâche de contrôle du véhicule afin d'en décharger l'opérateur ou de l'assister. »

1.3.2.3 Typologie des systèmes d'aide, selon Pauzié (2000)

Pauzié (2001) propose la classification suivante. Elle concerne les systèmes qui sont disponibles sur le marché ou qui le seront dans un futur proche. Elle distingue 3 types de systèmes : les systèmes de guidage, d'alerte et d'assistance. Notons que les systèmes d'assistance décrits ci-après correspondent partiellement aux systèmes d'alertes définis par Bellet et al. (2001)

1.3.2.3.1 Les systèmes de guidage

Ces systèmes d'aide à la navigation (ex : CARMINAT) ont pour objectif d'alléger les processus d'orientation en situation de conduite. L'intégration des informations en temps réel sur l'état du trafic peut être à l'origine de l'évitement de situations critiques. Une aide au guidage peut constituer une assistance d'autant plus effective chez certains conducteurs qui présentent des capacités fonctionnelles diminuées.

1.3.2.3.2 Les systèmes d'alertes

Ces systèmes ont pour objectif d’alerter le conducteur sur les évènements routiers ou météorologiques survenus en aval. Ces messages d’alerte sont diffusés le plus rapidement possible au conducteur et permettent la mise en place de processus d’anticipation vis-à-vis de ces évènements (exemple : le projet Inter-Vehicle Hazard Warning).

1.3.2.3.3 Les systèmes d’assistance

Ces systèmes sont conçus spécifiquement pour intervenir dans les situations accidentogènes. Ils peuvent pallier certaines latences de réaction et incertitudes de décision, inhérentes au fonctionnement humain en situation de conduite (ex : Collision Warning, Distance Warning, Curve Warning, etc.). Ce sont ces systèmes qui nous intéressent plus particulièrement dans le cadre de cette thèse (cf. notre chapitre 4). Ces systèmes diffèrent des alertes véhicules « classiques » et des autres systèmes d’aide actuellement proposés dans les véhicules car les interfaces de ces nouveaux systèmes doivent répondre aux contraintes suivantes :

- le conducteur ne le voit pas souvent, mais il doit le comprendre tout de suite ;
- les interfaces doivent être rapidement perçues et comprises, mais ne doivent pas être dangereuses en attirant à mauvais escient l’attention du conducteur.

1.3.2.4 Typologie selon Emberger (1993)

Enfin, quel que soit le type de système d’aide, il est important de retenir que pour assister le conducteur efficacement dans ses décisions ou actions, ses besoins et ses capacités d’interaction avec le système doivent primer dans la conception des futurs systèmes d’aides et de leurs interfaces. Ces dernières doivent être conçues pour prévenir les utilisations dangereuses et doivent, selon Emberger (1993) , améliorer :

- l’information du conducteur, soit sous la forme d’un conseil pour une action appropriée, soit sous la forme d’une alerte en cas d’évènements critiques en termes de sécurité,
- l’assistance dans les décisions ou dans les actions afin de réduire la charge mentale et physique du conducteur,
- l’intervention automatique dans les situations d’urgence ou d’erreurs de conduite.

Ce dernier mode doit être réservé aux situations extrêmes, pour éviter un accident ou réduire sa gravité. Le but n'est pas de remplacer le conducteur par un « pilote automatique ». Le conducteur est considéré comme une personne responsable, avec ses limites naturelles de capacité de contrôle, de traitement. Déléguer des tâches non-critiques à un système technique peut lui permettre d'allouer plus d'attention à l'aspect stratégique de la conduite et de toujours rester dans la boucle de contrôle. Il nous semble important de souligner que si le risque de « surcharge cognitive » est celui le plus souvent identifié dans le contexte des systèmes d'aide, celui de « sous-charge » est également à prendre en compte. Si le système prend en charge une partie de la tâche du conducteur, il faut s'assurer que le niveau de vigilance ou d'attention de ce dernier ne va pas s'amoinrir (ex : long trajet avec un système d'aide au maintien de la vitesse et des distances de sécurité).

1.3.3 Conclusion

En résumé, on peut retenir que grâce à ces différentes approches et notamment à l'accidentologie, les limites et les besoins du conducteur ont été largement étudiés. La technologie peut pallier certaines de ces limites et nous avons vu précédemment que de nombreux systèmes sont élaborés dans ce sens. Mais puisque l'humain ne sera pas totalement remplacé par la machine, il faut se demander comment ces systèmes peuvent apporter un réel soutien au conducteur, tout en le laissant dans la boucle. La question est : « quelles sont les informations dont a réellement besoin le conducteur pour réaliser sa tâche de conduite ? ». Färber (1993) répond : « toutes les informations qui améliorent la sécurité. » Mais comme il le dit lui-même, ce n'est pas si simple et le réel problème est de savoir de quelle sorte d'informations il s'agit et selon quelles modalités sensorielles et quelles interfaces elles doivent être présentées. Ces questions sont d'autant plus complexes que les différents groupes de conducteurs, novices ou professionnels, n'ont pas tous besoin des mêmes informations. En outre, un même conducteur peut avoir besoin d'informations différentes en fonction du contexte (route connue vs route inconnue, etc.). Une solution pourrait être de laisser toutes les informations à disposition du conducteur sur le tableau de bord, par exemple et de le laisser choisir, mais cette solution n'est absolument pas

appropriée. Il faut, au contraire, présenter la bonne information, au bon moment, via l'interface la plus appropriée. Différentes modalités sensorielles peuvent être utilisées pour atteindre cet objectif ambitieux.

1.4 Différentes interfaces pour les systèmes d'aide

Avant d'entrer dans la description des différentes interfaces des systèmes, rappelons que l'enjeu est de rendre compatible l'utilisation de ces systèmes avec les ressources perceptives et cognitives du conducteur et d'éviter de provoquer des surcharges cognitives ou d'interférer avec la tâche de conduite. L'enjeu en termes de sécurité est essentiel et les interfaces de ces systèmes ont un rôle primordial à jouer dans leur acceptation et leur utilisation sans danger.

1.4.1 Interfaces les plus répandues dans les véhicules.

1.4.1.1 Les interfaces visuelles

Lors de la consultation d'affichages visuels, le conducteur se trouve dans une situation de double tâche : une tâche de surveillance de la route et une tâche de prise d'informations sur l'interface. Ces deux tâches ayant recours au canal visuel, elles ne peuvent pas être effectuées en parallèle. Il est alors nécessaire que la prise d'informations sur le tableau de bord soit brève afin qu'elle interfère le moins possible avec la tâche principale de surveillance de la route en toute sécurité. Selon Hartemann et Setz (1988), « la position optimale serait à la limite du pare-brise et de la planche de bord à un angle latéral de 20 degrés de l'axe central du regard normal. » On sait, en effet, que plus la distance à l'axe optique est grande, moins les objets deviennent nets. Ainsi :

- une région de perception très nette correspond à une angle d'ouverture de un degré,
- une région moyenne à quarante degrés
- et une région périphérique à quarante / soixante dix degrés.

Si la déviation de l'axe central n'excède pas quarante degrés, un balayage optimal de l'environnement extérieur est assuré. La perception visuelle d'un écran et de son contenu

est meilleure si l'axe de regard est perpendiculaire au plan de vision. De plus, plus la vitesse du véhicule augmente, plus l'angle de vision est étroit, car une augmentation de la vitesse entraîne une focalisation du regard.

La position des icônes visuelles est essentielle car la composante visuelle dans la tâche de conduite est très importante. Pottier (1991) constate qu'un conducteur passe en moyenne 93 % du temps dans l'exploration de l'environnement routier. Selon cet auteur, la durée moyenne des patterns oculomoteurs spontanés sur le tableau de bord serait comprise entre 500 et 1000 ms. Ainsi, le traitement informatif visuel dans l'habitacle, que s'accordent les conducteurs, dure le plus souvent moins de 2 secondes. Hella, Rebiffer, Harteman et Lebreton (1983) appellent cette durée « la limite psychologique de sécurité que se donnent les conducteurs ». Rockwell (1928, cité par Pottier, 1991) la définit comme la limite temporelle au delà de laquelle, le conducteur prend des risques vis-à-vis du maintien de contrôle de son véhicule. Il faut que chaque signal ou information affichés sur le tableau de bord puissent être traités en 2 secondes maximum afin de préserver les conditions de sécurité.

Selon Neboit (1981), les durées moyennes de fixations les plus longues sont de 740 ms pour le compteur de vitesse et les plus courtes sont de 170 ms pour les marquages au sol. Ceci dépend entre autres de l'expérience et du niveau d'attention du conducteur.

Les interfaces visuelles existantes : les interfaces visuelles existent sous forme de voyants qui s'allument sur le tableau de bord et de messages textuels, habituellement présentés via un ordinateur de bord. Avec les systèmes d'aide à la navigation sont apparues les vignettes de guidage, situées en zone centrale de la planche de bord (A4), qui comportent des images (plans, flèches de guidage) et des messages textuels (ex : « tourner à gauche »). Mis à part les informations relatives à la navigation, les informations visuelles sont présentées sur les tableaux de bord (situés dans la zone A2 pour les berlines ou dans la zone A3 pour les monospaces), (voir schémas à partir de la page 42).

Toute interface visuelle doit être conçue de façon à ce que le conducteur puisse la consulter sans dégrader sa tâche de conduite. Elle doit être visible quelles que soient les conditions de conduite (nuit, virage, ...) et les caractéristiques des conducteurs (taille,

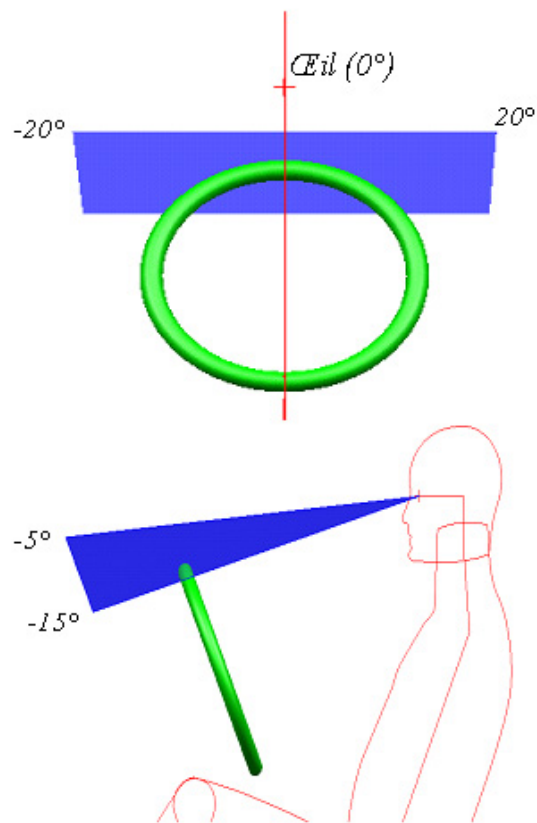


FIG. 1.1 – Affichages de premier niveau - Zone A1

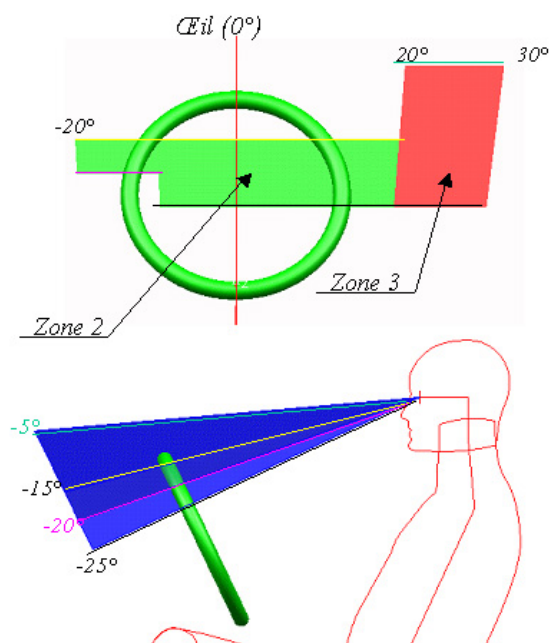


FIG. 1.2 – Affichages de deuxième niveau - Zones A2 ou A3

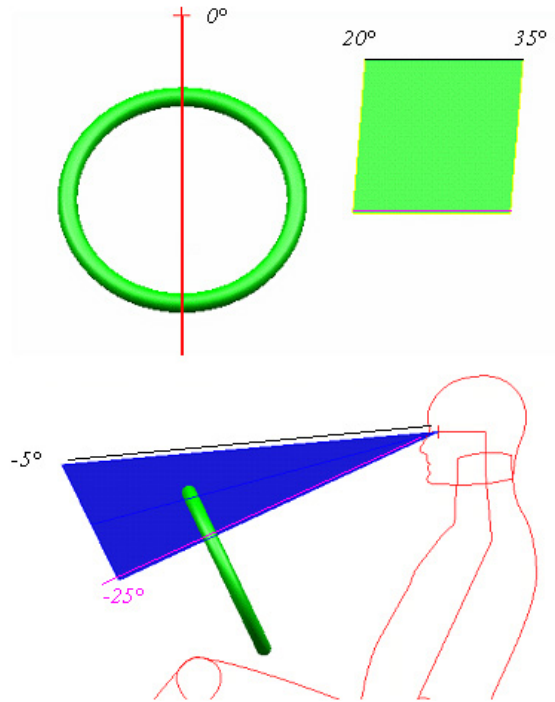


FIG. 1.3 – Affichages de troisième niveau - Zone A4

corpulence, ...). Il faut que ces icônes soient placées le plus possible au centre du tableau de bord. Les couleurs doivent être conformes aux habitudes des utilisateurs et aux normes en vigueur (ex : rouge pour les témoins associées à un danger immédiat).

Les témoins lumineux ont pour vocation de permettre une perception rapide de l'alerte : ils doivent être significatifs, permanents (tant que l'alerte est vraie) et avoir une couleur reflétant la nature de l'alerte. Il faut éviter le clignotement des témoins car cela peut gêner le conducteur. L'affichage textuel a pour vocation d'explicitier l'information présentée au conducteur, en précisant par exemple ce que signifie exactement tel témoin allumé. Il doit permettre au conducteur de mieux comprendre la gravité du problème et doit si possible être centré sur l'action à réaliser par le conducteur. Cependant, la lecture d'un texte, même court, nécessite un temps de détournement de regard plus important que la simple consultation d'un témoin d'alerte. Les messages textuels doivent donc être courts (16 caractères maximum), présentés sur une seule page.

1.4.1.2 Les interfaces sonores

Différentes études ont été menées sur la pertinence d'un message d'information auditif durant la situation de conduite. Spérandio et Dessaigne (1988) ont montré qu'une présentation auditive de l'information semble plus appropriée car la perception du message interfère moins avec la tâche de conduite qu'une présentation visuelle puisque la perception auditive ne nécessite pas de détournements de regards. Mais le stimulus auditif est bref et ne permet pas des relectures, contrairement à l'information visuelle qui peut rester affichée à l'écran et être consultée plusieurs fois si besoin.

Selon Deatherage (1972, cité par Spérandio et Dessaigne, 1988), la perception auditive semble préférable pour des messages brefs, demandant une réponse rapide ou lorsque le canal visuel est déjà fortement sollicité. La présentation auditive de l'information, pour ces auteurs, apparaît préférable, dans le contexte de leur étude, pour les messages brefs. Cependant, comme le message ne perdure pas dans le temps, il doit être immédiatement perçu par le conducteur, ce qui nécessite des ressources attentionnelles supérieures.

Labiale, Manberti, Baez, Conus et Aupetit (1988) ont recueilli les préférences subjectives de conducteurs, en fonction du mode de présentation (visuel versus auditif) et de la longueur du message (court versus long). Les résultats montrent une préférence pour la modalité auditive lorsque les messages sont longs (63%) car la présentation visuelle de messages longs donne l'impression aux conducteurs de perdre le contrôle de leur trajectoire. En revanche, 43% des conducteurs préfèrent la présentation visuelle pour les messages courts contre 23 % préférant la présentation auditive.

Notons que les temps de réponses à des stimuli auditifs sont plus courts que ceux associés à des stimuli visuels (Wickens, 1992).

Les interfaces sonores actuellement présentes dans les véhicules sont essentiellement des « bips » sonores. Mis à part certains véhicules qui sont équipés de synthèse vocale associée aux systèmes de navigation, les interfaces sonores présentes dans les véhicules sont assez limitées. Dans le domaine des alertes, le même bip sonore est actuellement utilisé pour toutes les alertes de niveau 1 (alertes rouges) signalant une défaillance grave de l'injection, du circuit de freinage, de la direction assistée, etc. , ainsi que pour la

reprise en main du système ACC (Automatic Cruise Control). Il doit toujours être associé à une interface visuelle comme le recommande la norme ISO / DIS 15006 ³. Il n'est là essentiellement que pour attirer l'attention du conducteur sur le fait qu'une alerte vient de s'allumer et non pour indiquer la nature du problème signalé. Le bip sonore doit être associé à une alerte nécessitant une réaction rapide et doit être de durée limitée.

1.4.2 Les limites des interfaces existantes

Les interfaces les plus utilisées dans le milieu automobile sont des voyants qui s'allument sur le tableau de bord, associés ou non à un bip sonore. Or, nous savons que les interfaces visuelles nécessitent un partage d'attention lorsqu'elles sont présentées en situation de conduite qui sollicite elle-même énormément le canal visuel. Plus le temps de détournement du regard de la route, provoqué par les interfaces visuelles classiques, est long, plus le risque de ne pas percevoir un problème dans l'environnement routier est grand.

Or, les systèmes que nous étudions sont des systèmes associés à des situations de conduite critiques, voire urgentes, où le danger potentiel provient de l'environnement extérieur, plus particulièrement de l'avant du véhicule. Nous sortons ici du cadre « classique » des alarmes déjà présentes dans nos véhicules. La problématique actuelle n'est plus d'informer le conducteur d'un dysfonctionnement plus ou moins grave de son véhicule (ex : crevaison, défaillance du circuit de freinage, etc.) mais de le prévenir d'une situation extrêmement critique pour sa sécurité.

Pour informer d'un dysfonctionnement du véhicule nécessitant son arrêt, un voyant rouge sur le tableau de bord associé à un bip sonore semble suffisant. Qu'en sera-t-il lorsqu'il s'agira de signifier la présence d'un obstacle dangereux sur la voie ? Une précédente étude nous a permis de montrer que ce type d'interface provoque une consultation du tableau de bord (Ethève - Théau, 2000). Les conducteurs actuels ont l'habitude de prendre les informations concernant leur véhicule sur le tableau de bord. Ceci s'explique facilement par le fait que c'est le seul emplacement où le véhicule peut communiquer explicitement

³Norme ISO / DIS 15006 : Toute alerte sonore doit systématiquement être dédoublée sur une autre modalité (notamment visuelle).

des informations le concernant. Pour un conducteur, la répartition des informations est pour le moment la suivante :

- devant moi ou latéralement, j’ai des informations concernant l’environnement extérieur (pare-brise et rétroviseurs)
- sur mon tableau de bord, j’ai des informations concernant mon véhicule.

Avec l’apparition des systèmes d’aide à la conduite, on modifie cette répartition des informations en faisant entrer à l’intérieur du véhicule des informations concernant l’environnement extérieur.

Cette volonté d’avertir le conducteur par le biais d’interfaces visuelles ou sonores ne va pas sans poser certains problèmes. Prenons par exemple le cas du système « Collision Warning » (aide à la détection d’obstacle). Grâce au radar installé dans le véhicule, le système détecte qu’un obstacle se situe sur la voie du véhicule ; il détecte également que le conducteur ne l’a pas perçu ou l’a mal estimé s’il n’y a pas eu d’action de freinage, ni d’évitement. Il faut alors l’informer du problème. Les solutions actuelles sont d’allumer un voyant rouge le plus visible possible sur le tableau de bord et d’y associer un bip sonore. Or, comme nous l’avons vu précédemment, ce type d’interface risque d’engager une consultation du tableau de bord et donc un détournement de regard de la route, où se situe justement l’obstacle à éviter.

De plus, le système Collision Warning étant un système associé à des situations très critiques, mais relativement rares, le conducteur n’est pas habitué à sa manifestation. On peut s’attendre à ce que le conducteur, qui ne connaît pas ce voyant, aussi explicite soit-il, le consultera plus longtemps qu’un voyant « classique » et que son temps de traitement de l’information sera plus long que s’il en avait l’habitude.

Dans cette logique, Tijerna, Jakson, Pomerleau, Romano et Peterson (1995), dans une étude concernant les interfaces pour les systèmes d’aide dont le but est de prévenir ou de réduire la sévérité des accidents en intégrant des technologies dans le véhicule, écartent les icônes visuelles classiquement affichées sur le tableau de bord, pour deux raisons :

- le détournement de l’attention visuelle de la scène routière est une des causes principales d’accidents. Une interface visuelle pour ce type de système détournerait

inévitablement les yeux du conducteur de la route, précisément au plus mauvais moment.

- Le fait d'utiliser des interfaces non-visuelles pour rediriger l'attention du conducteur sur la scène routière « libérerait » des ressources pour le traitement des informations visuelles issues de l'environnement, sachant que ces dernières sont essentielles pour le contrôle du véhicule et la gestion de la situation critique.

Cependant, ces auteurs précisent que les interfaces visuelles pourraient être associées aux autres interfaces si les études préliminaires mettent en évidence un besoin d'explicitation des interfaces sonores par la modalité visuelle.

Ainsi, nous avons vu qu'une interface sonore du type « bip sonore » n'était pas suffisamment signifiante pour le conducteur au point de dispenser de consulter un affichage visuel présenté simultanément sur le tableau de bord, a fortiori si plusieurs systèmes utilisent le même bip sonore. Or, dans les situations qui nous préoccupent, le conducteur ne dispose que de quelques secondes pour réagir. Il est alors impératif qu'il analyse rapidement la situation routière et que les interfaces ne détournent pas ou le moins possible son regard de la route. Face à un tel problème, il s'agira de trouver des solutions pour éviter la consultation du tableau de bord dans les situations critiques ou au moins limiter le temps de détournement de regard de la route. Il s'agira d'améliorer ces deux types d'interface afin de réduire les temps de perception et de traitement associés.

1.4.3 Nouvelles interfaces envisageables pour ces systèmes

Concernant la modalité visuelle, une présentation de l'interface dans un axe plus proche de celui de la scène routière est déjà un progrès possible. Pour la modalité sonore, il faut pouvoir la rendre plus explicite afin d'éviter au maximum une consultation du tableau de bord. Bien entendu, on peut combiner ces deux solutions.

1.4.3.1 Concernant la modalité visuelle

Rappelons que la prise d'information visuelle sur un tableau de bord oblige le conducteur à détourner son regard de la route en moyenne une seconde. Cette durée, qui dépend

de la perception visuelle du conducteur, peut se décomposer en trois phases (Kerihuel, 1989) :

- la phase balistique (ou de détournement de regard) qui correspond aux déplacements des yeux vers une cible. Cette phase correspond à un mouvement du globe oculaire dont la vitesse est supérieure à 60 degrés / seconde.
- la phase d'adaptation à l'environnement (luminosité, distance de lecture...) qui fait intervenir les mécanismes d'accommodation, de convergence binoculaire et de sensibilité au contraste. L'accommodation ou aptitude de l'œil à mettre au point, est une activité musculaire qui fait varier le cristallin pour que l'image se forme sur la rétine quelle que soit la distance œil-cible. Elle provoque à long terme une fatigue visuelle. La convergence binoculaire est une fonction qui permet d'obtenir la même image sur les deux rétines. Le passage d'un environnement lumineux (la route) à un environnement sombre (le tableau de bord) se caractérise par une variation du diamètre pupillaire qui n'est pas instantanée. Le temps d'adaptation de l'œil est beaucoup plus long lorsque l'on passe de la clarté à l'obscurité.
- la phase de lecture et d'interprétation de l'information.

Si l'on veut réduire le temps d'occupation du regard, il faut minimiser soit la durée de chaque phase, soit de l'une ou l'autre d'entre elles de façon sensible. Concernant la phase balistique, pour éliminer le mouvement du globe oculaire, l'information doit être placée au niveau des yeux du conducteur. Concernant l'accommodation et la convergence, elles sont quasiment éliminées si l'information apparaît dans un plan visuel situé à une distance analogue à la scène extérieure. Et le fait de présenter des informations dans un même environnement lumineux peut éliminer le temps d'adaptation du diamètre de la pupille. Enfin, concernant la phase de lecture et d'interprétation, les critères de taille du caractère, de couleur, de contraste doivent être optimisés, suivant le contexte, pour favoriser la prise d'information, tout en sachant que la durée de cette phase est pratiquement irréductible.

En résumé, il faut agir sur la modalité visuelle en présentant l'icône dans un axe plus proche de celui de la scène routière, afin de limiter ainsi le temps de détournement de regard. Il faut bien entendu également utiliser des icônes facilement identifiables et

compréhensibles, répondant aux critères ergonomiques habituels, sachant que la difficulté supplémentaire est de rendre les icônes suffisamment intuitives pour qu'elles soient comprises immédiatement par les conducteurs qui ne les verront que très rarement et dans des situations critiques et stressantes.

Pour essayer d'améliorer le temps de prise d'information visuelle, trois systèmes d'affichage sont possibles : l'affichage « Tête basse »(Head Down Display : HDD), l'affichage « Tête moyenne » et l'affichage « Tête haute »(Head-Up Display : HUD).

1.4.3.1.1 L'affichage « Tête basse »

Il permet d'éloigner virtuellement la position classique des informations contenues dans le tableau de bord, réduisant ainsi les sollicitations d'accommodation et de convergence binoculaire et de réduire légèrement le temps de détournement de regard. L'amplitude des mouvements des yeux ainsi que l'adaptation à l'environnement lumineux restent inchangés par rapport au tableau de bord conventionnel (Kerihuel, 1989).

1.4.3.1.2 L'affichage « Tête moyenne »

Il est placé au ras de l'angle de visibilité du pare-brise afin de minimiser les déplacements de l'œil et d'éliminer les problèmes de vision à travers le pare-brise. C'est un compromis entre les deux autres types d'affichage.

1.4.3.1.3 L'affichage « Tête haute »

Le principe du système d'affichage « Tête haute » est le suivant : les informations sont transmises à un afficheur dynamique (écran vidéo ou écran à cristaux liquides) placé dans la planche de bord. L'image de l'écran est ensuite relayée par un système optique composé d'une lentille et de miroirs, qui la projette sur le pare-brise, à travers un orifice pratiqué dans la partie supérieure de la planche de bord, à la hauteur de l'œil du conducteur. Celui-ci perçoit une image virtuelle qui semble se former non sur le pare-brise, mais au delà, au niveau de l'avant du véhicule. De nombreuses recherches ont mis en évidence certains avantages de l'affichage « Tête haute »(Gish et Staplin, 1995). En particulier, ce dernier a le potentiel d'améliorer les performances de conduite et la sécurité du conduc-

teur de différentes façons. Il est le seul de ces trois systèmes à superposer l'information avec l'environnement extérieur. L'affichage « Tête haute » présente les alertes visuelles dans l'axe du regard du conducteur et permet ainsi de les inclure dans la scène routière. Tout en effectuant sa tâche de conduite, le conducteur consulte l'information dans un même environnement lumineux sans pratiquement exercer d'effort visuel. L'intérêt d'un tel système dans l'automobile est de pouvoir superposer à la vision de la route les informations relatives à la conduite. On réduit alors considérablement leur temps d'acquisition et on évite une dispersion du regard. En même temps que le signal HUD, le conducteur verrait tout événement important sur la route et pourrait réagir immédiatement. Cette technique permet également de minimiser les temps de transition et d'accommodation associés à la prise d'information visuelle. Lorsque le conducteur doit lire une information présentée dans son véhicule, il effectue un mouvement que l'on peut décomposer en trois phases. Le tableau 1.2 présente ces trois phases ainsi que le temps (en secondes) qui est associé à chacune de ces étapes, pour une présentation d'information sur un tableau de bord conventionnel et via un système d'affichage « Tête haute »(HUD).

	Tableau de bord	Affichage « Tête haute »
Phase 1 : le temps de détournement du regard	0,2 s	0,05 s
Phase 2 : le temps de fixation (temps d'accommodation de l'œil + temps de lecture)	0,6s	0,4 s
Phase 3 : le temps de détournement retour	0,2 s	0,05 s
Total	1 s	0,5 s

TAB. 1.2 – Décomposition du temps de lecture en fonction de la zone d'affichage

Pour lire une information sur le tableau de bord, le conducteur va quitter la route des yeux durant une seconde, alors qu'il mettra moitié moins de temps si elle s'affiche via un HUD. Or, en 0,5 seconde, un véhicule qui se déplace en ville à 50 km/h, parcourt 7 mètres et sur l'autoroute à 130 km/h, un peu plus de 18 mètres. Outre ce gain de temps et donc de distance parcourue, l'affichage d'une information via le HUD se superposant à la scène routière, le conducteur pourra maintenir son attention sur la route grâce à la capacité de vision périphérique de l'œil. Ainsi, une interface « Tête haute » serait particulièrement pertinente lorsqu'un fort niveau d'attention est nécessaire pour traiter la scène routière

(Knoll, 1997 ; Mutschler, 1992).

Rutley (1975) a montré que les conducteurs maintenaient une vitesse de consigne plus facilement lorsque la vitesse était affichée en « Tête haute » plutôt que sur un tachymètre classique positionné sur le tableau de bord. Selon cet auteur, les conducteurs accordaient plus d'attention à leur vitesse, puisqu'ils la voyaient presque continuellement, sans avoir à rediriger leur regard et « sans effort » particulier. Sojourner et Antin (1990) ont obtenu des résultats similaires, avec 20 sujets, hommes et femmes, âgés de 19 à 51 ans, dans un environnement de conduite simulé. Tout en observant la scène routière, les sujets devaient réaliser trois types de tâches associées à la navigation, au maintien de la vitesse et à la détection de cibles. L'affichage de la vitesse en « Tête haute » a permis d'obtenir de meilleures performances à ces tâches : en particulier, les sujets détectaient significativement plus vite les cibles.

Cependant les avantages de la présentation d'informations visuelles via un affichage HUD doivent être contrebalancés par certains inconvénients. Tout d'abord, le contraste entre l'icône visuelle présentée et la scène routière peut être trop faible pour être perçu (par exemple, une lampe rouge avec un arrière-plan une façade en brique ou un toit de maison). Pour palier cet inconvénient, on peut par exemple projeter le signal sur un verre dépoli en bas de pare-brise. Par ailleurs, Mutschler (1992) souligne que l'affichage d'information dans la scène routière pourrait distraire le conducteur, que l'image virtuelle pourrait masquer des informations environnementales ou diminuer la quantité d'informations perçues et ainsi interférer avec la tâche de conduite, voire dégrader la performance du conducteur. En réponse à ces réserves, Hooey et Gore (1998), grâce à un simulateur dynamique de conduite, ont mesuré les effets sur la conduite de l'affichage d'informations relatives à la navigation via un système « Tête haute » comparativement à un affichage via un écran LCD placé sur la planche de bord, à droite du volant. Vingt-quatre sujets ont conduit dans trois contextes différents (2 en ville et un en campagne). Ils avaient pour consigne de conserver une vitesse cible et de bien rester dans leur voie de circulation. Ils devaient répondre, aussi vite que possible, à la survenue d'obstacles soudains (ballon, voiture, ...). Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les deux types d'affichage.

Les auteurs concluent que même si la performance n'a pas été meilleure dans la condition « Tête haute », cette étude montrait au moins qu'il n'y avait aucune dégradation de la performance dans cette condition. Pour eux, l'affichage HUD ne semble pas distraire les conducteurs.

En résumé, l'affichage d'informations en vision « Tête haute » présente des avantages certains, mais n'est pas pour autant la panacée. Les réserves émises quant à la possibilité de distraction du conducteur ne doivent pas être écartées et il semble important de ne pas surcharger ce nouvel espace d'affichage. Toutes les informations n'ont pas leur place dans l'axe du regard du conducteur. Il faut bien entendu réserver cet espace aux informations pertinentes et utiles pour l'activité de conduite. Ainsi, l'affichage « Tête haute » des icônes visuelles associées aux situations critiques de conduite pourrait être une solution tout à fait adaptée à notre problème. Il faut noter cependant que la majorité des études sur l'affichage « Tête haute » ont été réalisées en laboratoire ou sur simulateur de conduite. Il nous paraît essentiel d'évaluer un tel système dans une contexte de conduite réelle, en proposant des interfaces adaptées aux situations de conduite avant de conclure sur la pertinence de ce type d'affichage.

1.4.3.2 Concernant la modalité sonore

L'objectif serait de rendre « significatif » le message sonore, en le rendant « compréhensible » et spécifique du problème à traiter. Rappelons que les interfaces sonores sont de deux types : soit on émet un bip sonore, soit on « parle » au conducteur par le biais d'une synthèse vocale. La première solution est celle actuellement retenue pour informer le conducteur d'un problème associé à son véhicule. Cependant, il est difficile de faire comprendre par le biais d'un bip sonore : « Attention, obstacle dangereux devant vous ! », surtout lorsque ce même bip sonore est associé à des alertes différentes. Par ailleurs, si l'on se réfère à notre environnement quotidien, les interfaces sonores du type bip sonore, sont souvent utilisées pour signifier « Vous avez un message » (E-Mail, téléphone portable, répondeur...). Ces signaux sont utilisés pour attirer l'attention du conducteur, mais n'informent pas suffisamment ce dernier sur la nature du problème. Notre volonté

est de communiquer, le plus rapidement possible, la nature du problème, avec le minimum d'étapes.

L'utilisation d'une synthèse vocale qui serait spécifique à chaque système et qui préciserait la nature du problème, est de nature à éviter probablement un détournement de regard vers le tableau de bord afin de comprendre la signification du message sonore. Cependant, il faudrait évaluer les temps de perception et de réponse associés aux messages sonores diffusés par synthèse vocale et le stress induit, comparativement à une interface plus classique (bip sonore + icône visuelle) dans les situations de conduite auxquelles sont associés les systèmes étudiés.

De plus, les temps de déclenchement de la synthèse vocale et de diffusion du message (même court) sont actuellement trop longs pour être compatibles avec le délai temporel dans lequel se situent les systèmes étudiés. Enfin, les voix synthétiques sont parfois difficiles à comprendre et pourraient devenir une source de distraction pour le conducteur. Compte tenu de ces contraintes techniques, il faut envisager d'autres solutions, utilisant des interfaces sonores « non-verbales ». Une première possibilité serait de distinguer la source du problème par une interface sonore adaptée au contexte. L'objectif serait de différencier, par le canal de l'audition, les messages associés à un problème lié au véhicule (type alertes niveau 1), de ceux associés à un problème lié à l'environnement extérieur, ce dernier nécessitant un retour du regard et de l'attention vers la route et non pas vers le tableau de bord. Comme l'environnement sonore peut masquer certains sons, il semble important de choisir des sons dont la fréquence et l'intensité sont compatibles avec la majorité des situations routières et des conducteurs et que ces deux types de sons soient suffisamment distincts par leur fréquence et leur intensité pour être très facilement dissociés l'un de l'autre. Enfin, il faudrait utiliser, pour les problèmes liés à l'environnement extérieur, un signal sonore qui signifierait « attention danger extérieur » et qui provoquerait ainsi un retour de l'attention vers cet environnement et non pas vers le tableau de bord (ex : sirène des pompiers, crissements de pneu, sirène incendie, etc.). On parle alors d'icônes auditives. Alors que les interfaces sonores non-verbales traditionnelles sont définies par leurs caractéristiques acoustiques, les icônes auditives sont des sons associés à

la situation, à l'action ou à l'objet qui le crée (Mynatt, 1994). Ce sont des sons qui véhiculent un sens particulier, qui sont typiques d'un contexte ou d'un objet (ex : bris de verre, ...). Les icônes auditives peuvent être identifiées, catégorisées plus facilement que les sons non représentatifs (Belz, Winters, Robinson et Casali, 1997). Ainsi, l'utilisation d'icônes auditives pour les alarmes induirait un temps d'apprentissage du système plus court et probablement une amélioration de la performance du conducteur en termes de temps de perception et d'efficacité. L'étude menée par Graham, Hirst et Carter (1995) a confirmé ce résultat. Ils ont comparé les effets d'un signal sonore conventionnel associé au système anti-collision à une icône auditive, en mesurant les temps de réponse et en recueillant les préférences des conducteurs. Ces derniers étaient placés dans un simulateur statique et devaient freiner lorsqu'ils pensaient qu'une collision était imminente. Les situations de collisions possibles étaient « prévenues » par quatre types de sons : deux traditionnels (un bip sonore ou un message vocal disant « Devant ! ») et deux icônes auditives (un son de klaxon de voiture ou de crissement de pneus). Les icônes auditives ont entraîné des temps de réponse plus courts que les sons traditionnels, mais également davantage de fausses alarmes : les sujets freinaient alors qu'il n'y avait pas de collision imminente. Concernant ces fausses alarmes, cela montre que ces sons induisent réellement le « réflexe » de freiner et, dans les situations réelles de conduite, cela est plutôt positif. En revanche, il est essentiel que le système d'aide auxquels ces icônes auditives seront associées soit suffisamment fiable pour ne pas entraîner de fausses alarmes.

Une autre solution serait d'utiliser un signal sonore en trois dimensions (son 3D) car on regarde souvent dans la direction de ce qu'on entend. Par le biais de haut-parleurs disposés adéquatement dans le véhicule, il faudrait produire un signal sonore, dans l'axe du danger, afin d'attirer l'attention visuelle du conducteur dans la direction du danger. Pachiardi (1990) a utilisé la stéréo pour orienter l'attention du conducteur en direction d'obstacles (situés à gauche ou à droite) en produisant un son dans l'oreille gauche ou droite du conducteur grâce à des hauts-parleurs placés dans son appui-tête - ce qui évitait de déranger le passager. Ceci permettait d'orienter efficacement l'attention du conducteur sur le problème à traiter. Dans un projet plus récent mené par l'INRETS concernant un

système anti-collision (le Projet Anti-collision Radar et Optronique pour l'auTOMobile : PAROTO), cette interface sonore a été utilisée en étant associée à un signal lumineux directionnel (Le Guilloux, Lonnoy, Moreira, SAGEM, Alizon, Gallice, Trassoudaine, LASMEA, Bruyas, Tattegrain-Veste, Chapon, Deleurence et Poux, 2002). Différentes diodes étaient placées sur le tableau de bord et s'allumaient en fonction de la direction de l'obstacle. De même, Rudmann et Strybel (1999) ont étudié l'impact d'un son 3D sur la performance à une tâche de détection visuelle de cibles. Soit le signal sonore coïncidait spatialement avec la position de la cible visuelle, soit il était décalé. Les résultats montrent que dans le premier cas, les performances des sujets étaient meilleures, en termes de localisation et d'identification de cibles visuelles. Ainsi, la détection et la localisation de véhicules ou d'obstacles pourrait être facilitées par l'utilisation d'un son 3D approprié.

En résumé, notre problème principal reste de pouvoir dissocier les alertes liées à une défaillance véhicule de celles liées à l'environnement extérieur. Même si dans les deux cas, le freinage du conducteur est attendu, les contraintes temporelles ne sont pas les mêmes. Dans le premier cas, la consultation de l'icône présentée sur le tableau de bord est acceptable ; le conducteur dispose de plusieurs secondes pour réfléchir et agir. On recommande même d'associer un texte explicatif à ces alertes afin d'aider le conducteur à mieux comprendre la gravité du problème et pour, si possible, le guider dans l'action à faire ou à faire faire. Dans le cas des systèmes d'aide étudiés, surtout le Collision Warning, il reste très peu de temps au conducteur pour agir et éviter l'accident lorsque le système se déclenche. Il n'est alors pas envisageable de lui présenter un message textuel.

De plus, les conducteurs, surtout vieillissants, peuvent avoir une capacité visuelle et/ou auditive diminuée. Ceux qui portent des prothèses auditives évitent de les porter quand ils conduisent car les bruits de l'habitacle (moteur, ventilation, etc.), trop amplifiés, sont fatigants. Cela entraîne une mauvaise perception des différents signaux sonores comme les bips, les rappels sonores des clignotants, les messages vocaux éventuels, etc. Concernant la capacité visuelle, beaucoup de conducteurs ont une vue mal corrigée. Sauf les porteurs de verres progressifs, les conducteurs porteurs de lunettes donnent priorité à la vision de loin, au détriment de la vision de près, nécessaire pour la consultation des cadrans, mais

surtout des messages textuels éventuels.

Les possibilités d'amélioration des interfaces visuelles et sonores citées précédemment semblent pouvoir améliorer la perception et la compréhension des informations associées aux systèmes d'aide et en cela, nous l'espérons, elles pourraient diminuer le temps de réponse des conducteurs. Nous pouvons cependant nous demander s'il n'existerait pas un canal sensoriel, autre que le canal auditif ou visuel, qui pourrait nous permettre d'informer le conducteur, de façon plus adéquate. Dans les derniers articles concernant les systèmes d'aide dans le milieu automobile, certains auteurs suggèrent d'utiliser les interfaces haptiques pour prévenir le conducteur d'un danger potentiel.

1.4.4 Les autres modalités sensorielles

1.4.4.1 Les interfaces haptiques

Pour reprendre la définition de Gibson, la modalité haptique est « la sensibilité d'un individu à son environnement via son corps »(Gibson, 1966). Les interfaces haptiques correspondent aux interfaces qui « sont ressenties via les sensations et les perceptions tactiles, vestibulaires, ou kinesthésiques »(Tijerna, Johnston, Parmer, Pham, Winterbottom et Barickman, 2000). Le conducteur ne verrait, ni n'entendrait l'information transmise par le système, il la ressentirait. Théoriquement, l'avantage de ce type d'interface est qu'il y a une forte compatibilité « Stimulus-Réponse »(Wickens, 1992) et cette modalité sensorielle pourrait induire, chez le conducteur, une réaction appropriée. Par exemple, dans des situations de collisions fronto-arrières, la vibration de la pédale d'accélérateur pourrait induire un lâcher de cette pédale, voire un appui sur le frein. Cette modalité sensorielle permettrait d'agir davantage sur le comportement du conducteur en induisant des comportements, plutôt que sur la perception et la signification du message. Peut-être pourrait-on induire une réaction adaptée à la situation de conduite, même si le conducteur n'a pas traité tous les éléments de cette situation. Reprenons l'exemple de la vibration dans la pédale d'accélérateur : elle pourrait induire, plus ou moins par « réflexe », un lever de pied de l'accélérateur, qui fait déjà partie de la réaction nécessaire pour gérer la situation d'urgence à laquelle le conducteur est soumis. L'hypothèse généralement asso-

ciée à l'utilisation des interfaces haptiques est l'idée que le stimulus dispense le feed-back sensoriel produit par la réponse. Par exemple, un « volant actif », qui évoquerait le sens dans lequel il faut le tourner, faciliterait l'action du conducteur sur ce volant. Ce volant pourrait être une alerte qui « initierait » le type de commande, voire le sens dans lequel il faut le tourner pour éviter un obstacle ou une sortie de voie.

Les interfaces haptiques, parfois appelées les interfaces proprioceptives ou kinesthésio-tactiles, ont commencé à être étudiées dans le milieu de l'automobile par Fenton (1966) qui utilisait un joystick pouvant exercer une certaine force sur la main du conducteur. Cette interface était utilisée pour informer le conducteur de la distance à laquelle il suivait le véhicule précédent. Lorsque le conducteur le suivait de trop près, une force repoussait la main du conducteur. Cette force cessait lorsque la distance était correcte. Selon Fenton, cette interface agissant sur le sens du toucher était efficace : les conducteurs arrivaient à maintenir la distance de sécurité souhaitée.

Panik (1984, cité par Janssen, 1989) a étudié l'impact de différents concepts de « systèmes anti-collision » sur l'évitement de collisions fronto-arrières. Il a observé que, pour un système d'aide au maintien des distances de sécurité, une alarme sonore gardait plus souvent les conducteurs en dehors de la zone de danger qu'une alerte visuelle ou qu'une pédale d'accélérateur qui repoussait le pied du conducteur (appelée « pédale d'accélérateur active ») lorsque ce dernier suivait de trop près le véhicule précédent. Cependant, Janssen et Nilsson (1990) ont reconduit cette étude en comparant une interface sonore (bip), une interface visuelle (témoin rouge) et une interface haptique (pédale d'accélérateur active). Ils ont observé que, si toutes les interfaces ont réduit la fréquence des distances de suivi très courtes, seule l'interface haptique n'a pas entraîné d'augmentation de la vitesse, ni une augmentation du temps d'occupation de la voie de gauche (c'est-à-dire la voie de circulation en sens inverse sur une route deux fois une voie).

Ces mêmes auteurs (Janssen et Nilsson, 1993) ont réalisé, toujours sur simulateur de conduite, une autre étude similaire. Ils comparaient la « tâche de suivi », avec et sans système anti-collision. Les interfaces possibles étaient les mêmes que celles de l'étude précédente. Les 56 conducteurs étaient répartis en 8 groupes de 7 conducteurs : 1 groupe

contrôle sans système et 7 groupes ayant un système anti-collision. La route simulée était une route à 2 voies, avec des virages. Le véhicule précédent, appelé « véhicule-cible », apparaissait 48 fois, pendant 40 secondes, à une vitesse de 60, 70, 80 ou 90 Km/h. Des obstacles apparaissaient de temps en temps sur la voie de gauche pour éviter que le conducteur ne reste en permanence sur la seconde voie. Les auteurs ont relevé toutes les fois où le temps de suivi était inférieur à 1 seconde. Les résultats de cette étude confirment les bénéfices d'un système anti-collision utilisant une interface haptique : elle diminue le pourcentage de temps passé à moins d'une seconde de temps de suivi du « véhicule-cible », sans provoquer les effets négatifs mis en évidence dans l'étude précédente.

Notons cependant que la pédale d'accélérateur active utilisée par Janssen et Nilsson fournissait au conducteur un retour de force constant, indépendant de son temps de suivi. Cette pédale fonctionnait en mode « tout ou rien ». Or, Godthelp (1990), a évalué une pédale d'accélérateur active dont le retour de force était fonction du temps de suivi et a montré qu'un retour de force dépendant du temps de suivi augmentait la performance du conducteur. Suite à cette étude, Godthelp et Schumann (1991 ; 1993) ont évalué, sur simulateur de conduite, quel type de pédale d'accélérateur active serait le plus approprié pour un système d'aide à la régulation de la vitesse du véhicule. Huit conducteurs ont participé à cette étude. Ils devaient conduire sur une route à 2 voies, à une vitesse de 100 Km/h. Une fois cette vitesse atteinte et stabilisée (plus ou moins 5 Km/H), une « vitesse-cible » à atteindre (100, 85, 70, ou 55 Km/h) leur était indiquée sur l'écran central et ils devaient également effectuer un changement de voie afin d'éviter un obstacle. Plusieurs configurations de la pédale d'accélérateur ont été testées :

- soit la pédale d'accélérateur n'était pas modifiée (passive),
- soit la pédale avait un retour de force dépendant de l'erreur de vitesse,
- soit la pédale avait un retour de force dépendant de la position de la pédale,
- soit la pédale d'accélérateur vibrait (durée : 0,5s, fréquence : 10 Hz, amplitude de la force : 20 N)

Les résultats indiquent que la pédale d'accélérateur ayant un retour de force dépendant de l'erreur de vitesse était la plus efficace pour réduire cette erreur. De plus, l'utilisation

de cette configuration « intelligente » de la pédale d'accélérateur comme interface diminue le nombre de consultations visuelles du compteur de vitesse. Selon les auteurs, ces résultats confirment que l'utilisation d'un retour de force dans la pédale d'accélérateur peut améliorer la qualité de l'interface véhicule/conducteur, notamment en termes de charge mentale.

L'amplitude de la force exercée par la pédale a également fait l'objet d'autres études. Wang, Mick, Vernet et Fraigneau (1996) ont ainsi établi une relation entre la force exercée par le conducteur sur la pédale et la perception subjective correspondante. Ils ont ainsi mis en évidence que « la sensation perçue peut s'exprimer comme une puissance de la force normalisée ». L'étude a porté sur différents types de conducteurs, pour lesquels l'exposant varie de 1,5 à 2,5 suivant les groupes, qu'il s'agisse d'hommes ou de femmes, et suivant leur corpulence .

La règle ainsi mise en évidence a été ensuite appliquée pour évaluer la limite haute de la force exercée par la pédale, perçue comme « dure mais acceptable ». On retrouve dans ce cas des valeurs de 48N au total, soit un surcroît de 28N par rapport à la force dite de repos, à 20N.

Färber, Naab et Schumann (1991) ont étudié, sur simulateur de conduite, l'efficacité d'un volant actif (qui applique une force dans la direction dans laquelle le conducteur doit tourner son volant ou qui vibre) et d'une pédale d'accélérateur active comme interfaces de systèmes d'aide dans trois types de situation de conduite : la négociation de virages, le dépassement et le suivi de véhicule. Pour la conduite en virages, la pédale d'accélérateur active réduit la vitesse de passage en virage alors que l'application d'un couple constant (2 Newton.mètre (N.m)⁴), pendant une durée constante (0,5s) sur le volant n'a pas d'effet significatif sur le contrôle latéral du véhicule. Le système d'aide au dépassement consistait à éviter cette manœuvre lorsqu'un véhicule arrivait en sens inverse. L'interface qui permettait d'abandonner le plus tôt possible la manœuvre de dépassement était d'appliquer dans le volant une force de sens opposée à celle exercée pour effectuer le déboîtement. Le volant « vibrant »(pendant 2s, à 10 Hz avec une amplitude de 1 N.m) était moins efficace,

⁴Dans cette thèse, on utilisera aussi bien l'expression de la force (en Newton) que le couple (en Newton.mètre) pour quantifier le retour de force induit.

probablement car les vibrations étaient trop faibles pour attirer l'attention du conducteur. Les auteurs précisent que l'amplitude des vibrations doit être d'au moins 1,2 N.m. Dans la situation de suivi de véhicule, le véhicule précédent freinait brusquement, mais ses « feux-stop » ne s'allumaient pas. Les conducteurs ont eu des performances nettement supérieures en termes d'évitement d'accidents dans la condition où ils étaient avertis par la force exercée (225 N pendant 1 s) dans la pédale d'accélérateur.

Tijerna, Jackson, Pomerleau, Romano et Petersen (1996) ont étudié, sur simulateur de conduite, différentes interfaces possibles pour des systèmes d'aide à l'évitement de sortie de route. 64 conducteurs ont participé à cette étude : 16 n'avaient pas de système d'aide (groupe contrôle), 16 avaient le système avec une interface auditive, 16 avaient le système avec un volant actif, 16 avaient le système avec une pédale d'accélérateur active et 16 avaient le système avec une interface auditive et une interface haptique. Les résultats montrent que les conducteurs du groupe contrôle ont de moins bonnes performances que ceux qui avaient le système d'aide. En revanche, l'association des deux modalités sensorielles n'avait pas d'apport particulier.

Un autre type d'interface haptique a été étudié : le « jerk ». Cela consiste à « aspirer » la pédale de frein, pendant une courte durée. Kiefer et al. (Kiefer, Leblance, Palmer, Salinger, Deering et Shulman, 1999) ont utilisé un jerk (aspiration simple de la pédale de frein, pendant 0,6s, provoquant un pic de décélération à 0,24g) pour prévenir d'un obstacle sur la voie. D'après les résultats, le jerk provoquerait un « ralentissement du véhicule » pendant le temps de réponse du conducteur. Les auteurs soulignent cependant les problèmes associés à cette interface, notamment l'acceptabilité par le conducteur, le freinage sur route mouillée, etc.

Tijerna et al. (Tijerna, Johnston, Parmer, Pham, Winterbottom et Barickman, 2000) ont étudié, sur simulateur de conduite, différentes caractéristiques du jerk. Ils ont fait varier les caractéristiques du jerk en décélération induite (0,08 g/s, 0,20 g/s, 0,32g/s) et en durée (0,25s, 0,65s, 1s). Les résultats montrent que le jerk est une interface envisageable pour les systèmes anti-collision et que les valeurs optimales sont celles qui provoquent une décélération de 0,32g/s pendant 0,65s. En outre, plus la décélération induite par le jerk est

forte, plus le freinage effectué à la suite par le conducteur sera appuyé. En résumé, le jerk peut être une interface efficace pour prévenir le conducteur qu'un obstacle se trouve sur sa voie, mais il faut prendre en compte les éventuels effets négatifs de ce type d'interface et notamment étudier les réactions du conducteur qui peut croire que le véhicule va freiner « tout seul », ou être surpris et avoir une réaction inadaptée, voire dangereuse, sans oublier le côté très intrusif de ce jerk, pour le conducteur et les passagers.

D'une manière générale, les interfaces haptiques semblent prometteuses et sont à retenir comme interfaces envisageables pour les systèmes d'aide aux évitements d'accidents. Elles permettraient d'éviter une mobilisation dans l'urgence des ressources attentionnelles visuelles, modalité essentielle pour gérer la situation de conduite. Cependant, de nombreux points sont encore à étudier, car l'application d'interfaces haptiques dans l'automobile est très récente et les études ont été réalisées pour la grande majorité sur simulateur de conduite. Les réactions des conducteurs à ce nouveau type d'interfaces doivent être étudiées en contexte réel, sur des populations variées (novices, experts, personnes âgées. . .) avant de pouvoir conclure que ces interfaces sont les plus appropriées aux systèmes d'aide associés à des situations critiques de conduite.

1.4.4.2 Les interfaces olfactives

Étonnante, une autre modalité sensorielle a été étudiée au Japon pour pallier la baisse de vigilance : l'olfaction. Hirata (2001), dans le but de maintenir un niveau de vigilance suffisant sans déranger le conducteur, a mis au point un système qui utilise du parfum. Hiramatsu (1992) avait déjà rapporté que la diffusion d'un parfum augmente le niveau de vigilance. Hirata a utilisé cette capacité pour maintenir l'attention du conducteur. Il a réalisé une première expérience pour comparer l'effet d'une interface sonore et d'une interface olfactive sur la vigilance. Il a constaté qu'il est très difficile de rehausser rapidement le niveau de vigilance lorsque le conducteur est déjà dans un état d'hypovigilance. Il conclut alors qu'il faut éviter de laisser le conducteur atteindre cet état et qu'il faut pour cela maintenir en permanence le niveau de vigilance au dessus d'un certain seuil. Dans des conditions de conduite réelle (2 heures), il a constaté que le conducteur qui n'avait

pas de stimulation olfactive avait une baisse de vigilance au bout de 60 minutes, alors que celui qui était stimulé olfactivement n'avait pas de baisse de vigilance. Il a montré que le moyen le plus efficace pour maintenir un niveau de vigilance suffisant était de diffuser un parfum pendant une minute, à des intervalles fluctuant de 5 à 9 minutes.

Peu d'études ont été réalisées sur les interfaces olfactives et par rapport à la problématique de notre thèse, elles ne semblent pas adaptées à alerter le conducteur dans des situations d'urgence. Cependant, il nous semblait intéressant de citer cette étude pour montrer que les interfaces dans les automobiles ne se limitent plus à des interfaces visuelles ou sonores.

1.5 Conclusion

L'apparition de systèmes d'aide visant à pallier les défaillances des conducteurs entraîne la nécessité de concevoir des interfaces particulièrement adaptées aux contraintes du contexte de conduite, notamment lors de situations critiques, accidentogènes, voire d'urgence. Il faut ainsi savoir quelles informations présenter aux conducteurs, à quel moment et sous quelles formes. Concernant ce dernier point, les interfaces classiquement présentes dans l'habitacle (voyant visuel sur le tableau de bord, bip sonore) ne sont pas suffisamment adaptées aux systèmes d'aide associés à des situations d'urgence. De nouvelles interfaces, mettant en œuvre de nouvelles technologies ou utilisant d'autres modalités sensorielles, ont été conçues. Concernant la modalité visuelle, les limites d'une présentation visuelle d'informations sur le tableau de bord sont rapidement apparues s'agissant par exemple de prévenir le conducteur d'un danger imminent, extérieur au véhicule. Détourner le regard du conducteur de la route pour l'informer que, sur cette même route, se trouve un obstacle, semble assez paradoxal. Les concepteurs ont donc envisagé une présentation visuelle des informations sur le pare-brise, rendue possible grâce à la technologie « Head up Display ». Également, étant donné que la modalité visuelle est très largement sollicitée durant la conduite, d'autres moyens de faire passer l'information ont été élaborés, faisant appel à la perception auditive ou haptique (retour de force dans les pédales ou dans le volant, vibrations, ...).

A priori, nous pensons que ces interfaces innovantes seront plus adaptées pour communiquer avec le conducteur en cas de situations critiques, notamment pour ce qui concerne le partage d'attention. Cependant, cette hypothèse doit être vérifiée expérimentalement et les futurs systèmes doivent être évalués. Ces évaluations nécessitent une méthodologie adaptée : quels sont les moyens dont nous disposons pour réaliser ces évaluations ? Quelle méthodologie choisir pour répondre à notre problématique ? Le chapitre suivant abordera ces questions par une réflexion sur les différentes méthodologies possibles, afin de déterminer celles qui semblent les plus adaptées à l'évaluation des systèmes d'aide associés aux situations critiques et de leurs interfaces.

Chapitre 2

L'évaluation de l'interaction conducteur/système

Nous avons évoqué précédemment différentes contraintes auxquelles doivent répondre les systèmes d'aide à la conduite et différentes solutions possibles concernant leurs interfaces. Nous montrons ci-après comment évaluer l'impact de chaque solution sur l'activité de conduite au travers d'une analyse des interactions conducteur / système.

2.1 Critères d'évaluation des systèmes d'aide

Les critères de base concernant le regard que l'ergonomie peut porter sur la question des aides sont les suivants :

- l'utilité de l'aide ;
- l'utilisabilité ;
- l'efficacité ;
- la fiabilité ;
- la non-dangerosité ;
- la satisfaction des utilisateurs (en l'occurrence les conducteurs) .

2.1.1 L'utilité de l'aide

L'utilité d'un système se rapporte à son usage, à son emploi pouvant être avantageux ou répondant à un besoin. Il s'agit ici d'identifier l'intérêt réel d'un système pour les conducteurs, en vérifiant que les fonctionnalités de ce système correspondent aux besoins de ces derniers et s'intègrent facilement dans leur activité.

L'utilité semble être un critère évident : si une aide n'est pas utile, à quoi bon la proposer ? Il faut cependant se poser les questions suivantes : utile pour qui ? En quelles circonstances ? Dessaigne (2002) proposent deux approches possibles pour évaluer l'utilité d'un système d'aide : recueillir l'avis des utilisateurs ou engager une expertise ergonomique quant à l'activité actuelle et future pour vérifier l'adéquation de l'aide à l'activité dans le but d'en corriger les défauts constatés.

2.1.2 L'utilisabilité

C'est la facilité à utiliser un système, à le mettre en œuvre, à apprendre à s'en servir, à se l'approprier aisément parce que bien adapté aux caractéristiques de l'utilisateur. Les interfaces Homme - Machine (IHM) jouent un rôle important dans l'utilisabilité des systèmes. Elles doivent être aisément accessibles, bien lisibles (quelle que soit la modalité sensorielle concernée, visuelle ou auditive). La présentation des informations doit satisfaire les critères d'une bonne perception (taille des icônes visuelles, choix des couleurs, etc.), d'une attention suffisante (localisation dans le champ de vision, intensité des alarmes, saillance, etc.). L'affordance (Gibson, 1977, 1979) est la capacité d'un environnement à faire « percevoir » directement l'action. Dans le cas des systèmes d'aide étudiés, elle est particulièrement importante puisque le conducteur doit immédiatement comprendre le problème à traiter, sans avoir le temps d'aller chercher la signification de l'information dans une notice éventuelle. Notons à ce sujet que rares sont les conducteurs qui lisent les notices de leur véhicule avant de les utiliser. Il est donc fort probable qu'ils ignorent jusqu'à l'existence de ce type d'information avant qu'ils y soient confrontés en situation réelle et critique.

2.1.3 L'efficacité

C'est un critère qui complète les deux précédents. L'efficacité se mesure objectivement en termes de buts atteints, de temps gagné, d'erreurs évitées, de confort, de charge de travail diminuée, etc. Elle peut varier selon les compétences de l'utilisateur.

2.1.4 La fiabilité

La fiabilité d'un système fait référence à son bon fonctionnement. Elle s'évalue notamment en fonction du taux d'erreurs qu'il s'agisse de non-détections ou à l'inverse de fausses alarmes. Cependant, la fiabilité ne doit pas être réduite aux caractéristiques techniques du système, ni aux limites de l'humain. Elle doit prendre en compte les interactions dynamiques des opérateurs humains et des composantes technico-organisationnelles. Les capacités de l'humain à récupérer des erreurs, à anticiper, à intervenir dans des situations non prévues, représentent une composante importante de la fiabilité.

2.1.5 La non-dangereusité

C'est la moindre des choses qu'un système d'aide ne soit pas dangereux. Or, dans la conduite automobile, les informations sont souvent présentées au conducteur par une interface visuelle, potentiellement dangereuse parce que distractive. L'introduction d'un écran de visualisation à l'intérieur du véhicule, parfois mal placé, destiné à présenter des informations dont l'utilité est de second ordre, agit en concurrence avec la tâche principale. L'aide peut alors se révéler dangereuse.

2.1.6 La satisfaction des conducteurs

Afin de limiter le rejet du système d'aide et de faciliter son approbation, il est important de respecter les habitudes des utilisateurs et de prendre en compte leurs opinions. Logiquement, la satisfaction devrait être corrélée à l'utilité, à l'utilisabilité et à l'efficacité. En pratique, elle ne l'est que partiellement. Néanmoins, la satisfaction des utilisateurs s'harmonise avec la qualité technique, au moins à terme et les systèmes bien conçus finissent

souvent par s'imposer.

2.2 Critères d'évaluation pour la présentation des informations

Comme nous l'avons vu précédemment, les ressources du conducteur investies pour le traitement des informations fournies par le système d'aide sont concurrentes de celles nécessaires à la tâche principale de conduite. Le problème actuel est de ne pas détourner inutilement ou dangereusement l'attention du conducteur. Afin de répondre aux critères ci-dessus (plus particulièrement à l'utilisabilité, l'efficacité et la non dangerosité), la présentation des informations au conducteur doit être bien adaptée au contexte de conduite. Les interfaces des systèmes d'aide doivent donc absolument répondre aux critères suivants pour limiter les risques de concurrence entre le traitement des différentes informations fournies au conducteur et sa tâche de conduite :

2.2.1 Pertinence des informations

La présentation d'informations non pertinentes peut distraire inutilement le conducteur de sa tâche principale. Il est nécessaire de pouvoir distinguer les informations dont le conducteur a besoin pour conduire sûrement, de celles qui risquent de détourner inutilement son attention. Seules les informations pertinentes pour une conduite sûre devront être présentées.

2.2.2 Une perception rapide

Il est essentiel que l'information présentée au conducteur puisse être perçue dans des temps très courts. Si les informations visuelles ne sont pas présentées en vision tête haute, le conducteur doit nécessairement détourner son regard de la route pour percevoir l'information présentée par le système d'aide. Il est évident que plus l'excentration sera limitée en distance et en durée, meilleure sera la sécurité.

2.2.3 Une présentation sans ambiguïté

La présentation des informations doit certes permettre une perception rapide, mais elle doit surtout permettre une interprétation du signal non ambiguë. Il faut donc s'assurer que la présentation de l'information permet au conducteur de comprendre rapidement et correctement la signification du signal.

2.2.4 Une présentation « non intrusive »

Lorsqu'une information est présentée, elle doit respecter la tâche principale du conducteur. Il est primordial que le mode de présentation soit adapté au degré d'urgence de l'information et qu'il ne génère pas de risque supplémentaire pour le conducteur.

Rappelons que, selon Van Elslande et Nachtergaele (1992) :

- « des usagers confrontés soudainement à une information inattendue peuvent, sous l'influence de l'effet de surprise et de la peur induite, réagir de manière incontrôlée (coup de volant ou freinage intempestif) ou ne pas réagir du tout (sidération). »
- « qu'une information provienne de l'environnement ou d'un dispositif embarqué, sa prise en compte dépendra directement de sa détectabilité. »

Par conséquent, deux traits majeurs se dégagent : les signaux présentés ne devront concerner que des informations pertinentes et utiles et devront permettre une prise en compte rapide de l'information. Le signal devra être clair, univoque et perçu le plus rapidement possible. Ainsi, toute aide doit être à même de réorienter l'attention vers les éléments pertinents de la situation, sans toutefois engendrer un effet de surprise préjudiciable à la récupération de la situation. Les informations transmises devront répondre directement à un besoin concret de l'utilisateur et la définition de la forme et des conditions dans lesquelles ces informations devront être transmises par un système d'aide devra tenir compte des limitations possibles du point de vue de leur utilisation par un opérateur, qui a des caractéristiques spécifiques, des stratégies et des objectifs particuliers et qui est déjà engagé dans une tâche dynamique et complexe.

2.3 Méthodologie d'évaluation

2.3.1 L'accidentologie versus la démarche expérimentale

L'objectif de l'accidentologie est de connaître les situations d'accidents pour définir les systèmes de sécurité à mettre en œuvre.

La démarche expérimentale permet de répondre à des questions posées en termes de facteurs à comparer. Dans la recherche automobile, elle consiste à évaluer différentes possibilités lors d'expérimentations où la performance du couple conducteur-véhicule est étudiée. Cette démarche n'autorise pas la quantification directe du gain obtenu en termes de vies épargnées mais elle présente l'intérêt de permettre la séparation et le contrôle de facteurs pertinents et d'obtenir des données quantifiables. Le fait de réaliser des expérimentations permet de reproduire autant de fois que nécessaire une même situation critique et donc de disposer de données liées à des circonstances parfaitement comparables. Dans le cadre de la démarche expérimentale, le comportement du conducteur peut être étudié dans diverses situations : en laboratoire, sur simulateur, sur piste ou en environnement réel (voir plus loin). On définit alors différents scénarios qui correspondent aux situations prédéfinies que les conducteurs vont rencontrer. Quatre types de situations peuvent composer les scénarios : les situations nominales, les situations « normales », les situations critiques et les situations extrêmes.

- Les situations de conduite nominale correspondent aux situations où ni l'environnement, ni le véhicule, ni le conducteur ne présentent de risque pour les différents usagers de la route. Par exemple, la conduite d'un véhicule, en parfait état de marche, sur une route sèche, par beau temps, avec très peu de trafic et un sujet en pleine forme correspond à ce type de situation. On notera le caractère relativement exceptionnel de ces situations.
- Les situations « normales » de conduite font référence aux situations habituelles de conduite. Tout n'est pas parfait, mais rien n'est particulièrement défaillant non plus : trafic moyen, route en bon état, conducteur en état de vigilance correct, etc.
- Les situations critiques correspondent à des situations où il y a un risque d'incident

ou d'accident, où au moins un des trois composants du système est défaillant : conducteur fatigué, mauvaises conditions climatiques, matériel dégradé.

- Les situations extrêmes correspondent à des situations hautement critiques dans lesquelles le risque d'incident ou d'accident est très élevé (pneu qui éclate, conducteur somnolant, véhicule refusant une priorité, etc.), avec des temps de réponse attendus très courts.

Dans le cadre de notre étude, l'accidentologie n'est pas utilisable puisque l'évaluation de la présentation des informations au conducteur concerne essentiellement des systèmes qui ne sont pas encore sur le marché. L'accidentologie peut cependant nous guider dans le choix des critères concernant la présentation des informations, comme nous l'avons vu précédemment avec l'étude de Van Elslande et Nachtergaele (1992).

Une approche expérimentale est donc de rigueur dans ce type d'étude. Cette méthode peut être appliquée dans différents contextes d'étude plus ou moins réalistes : en laboratoire, sur simulateur, en conduite sur piste, en conduite réelle.

2.3.2 Différents moyens d'expérimentation

2.3.2.1 En laboratoire

Différentes études sont menées en laboratoire utilisant des tâches similaires à la conduite automobile (par exemple, les tâches de « tracking », (Bellet, 1998)). Bien que les expériences menées dans ces conditions aient donné des résultats intéressants, on peut toujours se poser la question de la validité (écologique) de ces situations expérimentales. La conduite automobile s'avère, en effet, être plus complexe que le simple fait de maintenir un curseur sur un point qui se déplace. Les résultats obtenus dans ces conditions peuvent être tout à fait pertinents, mais il est nécessaire de savoir dans quelle mesure ils sont transposables à la conduite automobile en situation réelle. Concernant l'évaluation de la présentation d'informations au conducteur, on peut toujours expérimenter avec des sujets statiques diverses formes d'interfaces, mais l'interaction entre le conducteur, le véhicule et l'environnement doit être prise en compte. Une situation plus réaliste, impliquant des sujets engagés dans la tâche de conduite si particulière, nous semble davantage appropriée.

2.3.2.2 Avec un simulateur

Le simulateur de conduite automobile est utilisé dans de nombreuses recherches (De Waard, 1996 ; Fowkes, 1984 ; Kurokawa et Wierwille, 1990 ; Malaterre, 1994 ; Noy, 1989). Il permet de mettre le conducteur dans des situations accidentogènes, sans pour autant mettre en jeu sa sécurité. Les scénarios de conduite choisis peuvent être reproduits à l'identique, autant de fois que nécessaire. L'expérimentateur peut ainsi contrôler les conditions expérimentales auxquelles sont soumis les sujets. En revanche, se pose une fois de plus le problème de la validité écologique des résultats obtenus sur simulateur : les perceptions, les sensations, les risques encourus, etc., diffèrent de la conduite réelle, d'autant que les simulateurs ne reproduisent pas (ou très imparfaitement) les interactions avec les autres conducteurs. On peut alors se demander dans quelles mesures les sujets conduisent « comme ils en ont l'habitude ».

2.3.2.3 Sur piste

La conduite sur piste se rapproche davantage de la situation de conduite habituelle. La différence fondamentale réside dans le fait que l'environnement routier est très pauvre comparativement à la conduite dans des conditions réelles de trafic. Elle permet cependant d'obtenir une meilleure validité des résultats puisque les sujets doivent réellement conduire un vrai véhicule et éviter d'avoir un accident.

2.3.2.4 Sur route

La conduite sur route, dans des conditions de trafic habituelles (Dingus, Antin, Hulse et Wierwille, 1989 ; Kurokawa et Wierwille, 1990 ; Malaterre, 1994 ; Sojourner et Antin, 1990) est sans aucun doute la méthode la plus réaliste et la plus écologique. Son inconvénient majeur réside cependant dans le mauvais contrôle des situations et leur difficile reproductibilité. Il est difficile de contrôler tous les paramètres des conditions de passages comme les conditions de trafic ou de météorologie qui peuvent être très variables. Elle présente par ailleurs d'autres inconvénients :

- la sécurité des conducteurs est davantage mise en jeu. Certains auteurs utilisent un

véhicule équipé d'un double système de pédalier et emploient un moniteur d'auto-école comme copilote afin d'assurer la sécurité de leurs sujets (De Waard et Brookhuis, 1991). Cependant, la mise en place de tels équipements est assez coûteuse.

- Les conducteurs sont placés dans des situations de conduite auxquelles ils ne sont pas habitués : véhicules qui n'est pas le leur, matériel prototype, trajet imposé, etc. et se savent observés. Il est probable que leurs comportements diffèrent sensiblement en situation réelle habituelle.
- Les scénarios interdisent de placer les sujets face à des situations accidentogènes. Il en résulte que cette méthodologie est peu appropriée à des études sur ces situations, mais correspond davantage à des études concernant les comportements de conduite visant par exemple à modéliser le conducteur en diverses circonstances (Bellet, 1998 ; Briois, 1998 ; Saad, 1975).

2.3.3 Les mesures classiquement utilisées dans la littérature

Afin d'évaluer nos futurs systèmes d'aide à la conduite, nous avons besoin de mesurer l'impact de ces systèmes sur la conduite et en particulier sur l'attention du conducteur. Nous voulons donc être à même de mettre en évidence les variations d'attention du conducteur. Nous avons trouvé une abondante littérature concernant les mesures de la charge mentale du conducteur et, notamment, plusieurs critères nous ont semblé pertinents pour notre recherche. D'une part, les critères concernant les techniques d'évaluation mis en évidence pour évaluer la charge mentale nous semblent appropriés à l'évaluation de l'attention. D'autre part, certains indicateurs de la charge mentale devraient également nous permettre de mesurer les variations quantitatives et qualitatives de l'attention du conducteur.

2.3.3.1 Les critères d'évaluation d'un instrument de mesure

Les qualités d'un instrument de mesure sont : la fidélité, la sensibilité, la justesse et l'exactitude ; l'ensemble de ces qualités constituant la fiabilité de l'instrument (McLeod et Strigler, 1998).

- La fidélité est « l'aptitude à donner, dans des conditions d'utilisation définies, des réponses très voisines lors de l'application du même signal d'entrée »(AFNOR X 07001). La fidélité est à la base de deux qualités essentielles de la mesure : la répétabilité et la reproductibilité. On parle de répétabilité lorsque les répétitions de la mesure sont faites dans les mêmes conditions et de reproductibilité lorsque l'on fait varier, d'une répétition à l'autre, certaines conditions telles que le lieu, l'expérimentateur, le moment de l'expérience, l'instrument de mesure lui-même.
- La sensibilité est le quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée (AFNOR X 07001).
- La justesse qualifie un instrument pour lequel la moyenne des indications données est très voisine de la valeur vraie de la grandeur à mesurer.
- L'exactitude qualifie un instrument qui donne des indications individuelles très voisines de la valeur vraie de la grandeur à mesurer.

De Waard (1996) évoque également deux autres critères :

- La sélectivité (« Selectivity ») : la mesure doit être uniquement sensible à la variable choisie et ne doit pas être influencée par d'autres facteurs.
- La fiabilité (« Reliability ») : la mesure doit être répétable au sein et entre les passations.

En outre, selon O'Donnell et Eggemeier (1986), les différentes mesures permettant de mesurer la charge mentale du conducteur doivent répondre à d'autres critères :

- La « diagnosticité »(« Diagnosticity ») est la capacité d'une mesure à discerner le type ou la cause de la charge mentale ou la capacité à l'attribuer à un ou plusieurs aspects de la tâche du conducteur.
- L'intrusion dans la tâche primaire (« Primary-task intrusion ») est le degré avec lequel une technique de mesure modifie la performance à la tâche principale, ici la conduite automobile. Il ne faut pas que nos techniques de mesures modifient la manière et la capacité de conduite du conducteur. La mesure ne doit pas modifier la performance à la tâche primaire, ni entraîner une variation de la charge mentale.
- Les contraintes de l'implémentation (« Implementation requirements ») font référer

rence aux contraintes pratiques liées à la technique de mesure. L'équipement que nécessite la mesure ne doit pas perturber la tâche de conduite, ni l'état du conducteur.

- L'acceptabilité par l'opérateur (« Operator acceptance ») : l'opinion de l'opérateur sur une technique de mesure, surtout pour les mesures subjectives, influence la justesse et la fiabilité de la mesure.

Concernant les critères auxquels doivent répondre les techniques de mesure de la charge mentale, De Waard (1996) estime qu'une haute sensibilité, un large champ d'application, une haute fiabilité et une faible intrusion dans la tâche primaire sont les plus importants.

2.3.3.2 Description des mesures

Si la catégorisation des différentes mesures présente inévitablement des limites, des distinctions fondamentales peuvent cependant être faites. Dans le cadre de cette thèse, nous avons distingué trois catégories de mesures :

- les mesures physiologiques qui sont liées à la physiologie du sujet ;
- les mesures subjectives qui font appel au jugement du sujet sur la situation ;
- les mesures de performance qui s'attachent à l'efficacité du sujet dans la réalisation d'une ou plusieurs tâches durant l'expérimentation.

L'enregistrement de signaux physiologiques permet d'étudier l'état d'activation du conducteur, ses intentions et ses réactions à des événements extérieurs. L'analyse de la dynamique du véhicule et de l'activation des commandes renseigne sur l'action du conducteur. L'interview et le questionnaire permettent de documenter certains points de la perception mais leur apport reste limité dans un contexte d'urgence car le recueil des données ne peut avoir lieu en même temps que la situation critique elle-même.

2.3.3.2.1 Mesures physiologiques

Les mesures physiologiques permettent de refléter l'activité du système nerveux qui est généralement décrit comme étant organisé de la façon suivante :

- Le système nerveux central (SNC) est le centre de la régulation de tout le système nerveux. Il émet des influx moteurs nerveux et réalise l'analyse de données sensibles.

Il comprend l'encéphale et le cervelet.

- Le système nerveux périphérique (SNP) est responsable de la transmission des influx nerveux vers ou à partir des nombreuses structures de l'organisme. Il comprend de nombreux nerfs qui relient le SNC aux muscles et aux glandes. Il comporte lui-même :
 - les voies afférentes qui transmettent l'information des récepteurs sensoriels des muscles et des glandes vers le SNC
 - les voies efférentes qui transmettent l'information du SNC vers les muscles et les glandes). Ces voies efférentes sont pour leur part composées :
 - du système nerveux somatique qui contrôle les muscles squelettiques,
 - du système nerveux végétatif (SNV) encore appelé système nerveux autonome (SNA), qui innerve tous les organes du corps et qui contrôle les glandes, les muscles lisses et le muscle cardiaque. Il est responsable de la régulation et de la coordination des fonctions vitales de l'organisme. Il permet d'apporter les ajustements requis par les conditions du moment. Il est lui-même composé de deux sous-systèmes neurovégétatifs qui ont des effets antagonistes sur les organes sur lesquels ils agissent tous les deux comme le coeur, les muscles lisses et les glandes :
 - le système orthosympathique (dit encore sympathique) qui est orienté vers la dépense d'énergie pour répondre aux situations immédiates d'urgence (effet à court terme) ;
 - le système parasympathique qui est supposé servir à accumuler et économiser les ressources de l'organisme (effet à long terme).

La conception moderne du système nerveux le décrit comme une totalité auto-organisée, possédant plusieurs niveaux d'activation qui sont autant de subdivisions hiérarchisées. Le système nerveux périphérique, avec ses composantes végétative (le système nerveux autonome : SNA) et somatique reste sous la dépendance du système central (SNC). Les activités végétatives varient en fonction du niveau de vigilance. On observe alors, au cours de l'activation, des variations du rythme cardiaque, de la dilatation des vaisseaux sanguins, du rythme respiratoire, du diamètre de la pupille, du fonctionnement de glandes déversant

leurs sécrétions à l'extérieur du corps (comme les glandes sudoripares dont l'activité plus ou moins grande fait varier les propriétés électriques de la peau) ou des glandes dont les sécrétions se mêlent au courant sanguin (glandes endocrines), etc. (Reuchlin, 1977). L'étude du SNA pourrait également nous renseigner sur la perception d'un événement ou d'une action à réaliser en termes émotionnel (type, intensité, etc.) ou de la complexité de la tâche (charge cognitive, niveau d'attention requis, etc.) . Ainsi, il est possible de mesurer l'activité du SNC soit directement par des mesures issues de l'électroencéphalogramme (EEG), soit par l'intermédiaire de ses manifestations végétatives périphériques (au niveau du SNA).

Ces mesures peuvent être obtenues par diverses techniques mais elles ont en général en commun une faible intrusivité, qui permet de limiter leur impact sur la tâche. Elles permettent pour la plupart des mesures quasi-continues durant l'expérimentation. Cependant, il peut être difficile de distinguer les causes multiples de leurs variations et de s'affranchir de la faiblesse du rapport signal-bruit qui en découle. Les mesures les plus courantes sont présentées ci-après.

2.3.3.2.1.1 Les mesures issues de l'électroencéphalogramme

Si l'on place des électrodes sur le cuir chevelu ou le haut de la nuque, on recueille de faibles potentiels électriques dont le voltage oscille régulièrement (on parle d'ondes). Les signaux centraux sont alors recueillis et traités (additionnés, amplifiés, filtrés) afin de faire apparaître ces ondes. L'enregistrement graphique de ce phénomène constitue un électroencéphalogramme (EEG). Il est utilisé comme reflet de l'activité du cerveau car la fréquence des oscillations varie avec l'activité du cortex cérébral. En général, l'EEG a une fréquence basse et une amplitude élevée durant le sommeil. Avec l'accroissement de l'activité mentale, la fréquence croît et l'amplitude décroît. Ainsi, lorsque le sujet est attentif, actif, ces ondes oscillent très rapidement et sont de bas voltage. Si le sujet est en état de veille diffuse, inattentif et inactif, ces ondes oscillent plus lentement et sont de voltage plus élevé (rythme α). Une stimulation sensorielle brusque ou une activité mentale, font passer l'EEG de la seconde à la première de ces formes (Reuchlin, 1977).

La méthode des potentiels évoqués (Evoked Cortical Potentials ECP) mesure les ré-

ponses cérébrales lorsqu'un ou plusieurs organes sensoriels sont stimulés. Une façon d'évaluer la charge attentionnelle via l'EEG est d'utiliser les potentiels associés à un stimulus spécifique (Event Related Potential : ERP). On s'intéresse notamment à un pic qui survient 300 ms après la présentation d'un stimulus et qu'on nomme P300. Il est lié au traitement de l'information. L'amplitude positive du P300 est utilisée comme mesure de l'attention nécessaire pour évaluer le stimulus (Donchin, 1981).

En outre, une étude menée par Ray et Cole (1985) a permis de différencier l'activité électroencéphalographique pendant deux tâches différentes : la première tâche ne supposait pas un traitement d'informations issues de l'environnement (comme le calcul mental par exemple) et provoquait des ondes α , majoritairement sur le cortex pariétal. La seconde dépendait de la prise en compte de données extéroceptives et laissait apparaître des ondes β sur les aires temporales pour les tâches à implications émotionnelles et sur les aires pariétales pour les tâches cognitives.

Ainsi, l'EEG constitue un instrument d'investigation directe des processus attentionnels (Obrist, 1970, 1976, 1981 ; Gale et Edwards, 1983). Cependant, de nombreuses mesures sont généralement recueillies et moyennées afin de pouvoir être utilisées de façon efficace et réduire les effets de fausse activité (Williges et Wierwille, 1979). Par ailleurs, certaines contraintes sont associées à cette technique, notamment le fait que la posture du sujet influence les potentiels évoqués (Defayolle, Dinand et Gentil, 1973).

2.3.3.2.1.2 Le rythme cardiaque et ses composantes

Les caractéristiques du rythme du système cardiovasculaire ont été largement utilisées dans le but de mesurer l'état physiologique et l'effort cognitif, aussi bien en laboratoire que dans des études de terrain. Le cœur est, en effet, contrôlé par le système nerveux autonome, ainsi nommé parce qu'il régit le fonctionnement des organes internes, qui ne sont pas contrôlés volontairement. Cette connexion soumet le rythme cardiaque aux états physiques et émotionnel, ainsi qu'aux activités cognitives (Mulder, 1980 ; Wiethoff, 1997). C'est la mesure la plus utilisée (De Waard, 1996 ; Meshkati, 1988). Le matériel de mesure qu'il nécessite est assez simple et facile à poser. Il existe de nombreux indicateurs issus du rythme cardiaque (la fréquence cardiaque moyenne, l'arythmie cardiaque, ...), mais

ils sont sensibles à la fatigue et aux événements ponctuels.

La fréquence cardiaque et la variation de la fréquence cardiaque ont été de ce fait identifiées comme deux indicateurs utilisables pour évaluer la charge mentale, dans un contexte de pilotage d'avion ou de conduite automobile.

De manière générale, le rythme cardiaque fournit un indicateur de la charge de travail globale ou de l'activation. La variabilité du rythme cardiaque est en revanche plus utile pour évaluer la charge cognitive ou mentale (Wilson et Eggemeier, 1991). Les profils de mesure du rythme cardiaque et de sa variabilité peuvent être ainsi interprétés en les comparant à des événements spécifiques et générateurs de charge, dans un contexte de conduite automobile. De nombreuses études (Auffret, Seris, Berthoz et Fatras, 1967 ; Hancock, Meshkati et Robertson, 1985 ; Kalsbeek, 1973 ; Ruffell Smith, 1967 ; Wierwille et Connor, 1983) se sont intéressées à l'effet de la charge mentale sur le rythme cardiaque, avec des résultats variables. Certains, comme Lindholm et Cheatham en 1983, ont ainsi établi que le rythme cardiaque augmente avec la charge alors que d'autres (Auffret et al., 1967 ; Kalsbeek, 1973) ont de leur côté mise en évidence un comportement inverse, avec une décroissance du rythme cardiaque.

La mesure de cet indicateur a été réalisée sous 3 formes :

- mesure du rythme cardiaque ou d'une valeur dérivée ;
- analyse spectrale du signal constitué par le rythme cardiaque ;
- combinaison des deux premières méthodes.

La mesure est extrêmement sensible aux variations de la charge mentale et offre l'avantage d'être simple à obtenir et à interpréter (Hancock et al., 1985). Néanmoins, son usage doit être entouré d'un minimum de précautions car elle est également sensible à d'autres facteurs, tels que le stress.

Le rythme cardiaque est connu pour sa dépendance vis-à-vis de l'activité physique, de la respiration, de la régulation thermique et de la préparation musculaire au mouvement (Lysaght, Hill, Dick, Plamondon, Linton, Wierwille, Zaklad, Bittner et Wherry, 1989). Kalsbeek et Ettema (1963) ont montré que les fluctuations de l'intervalle entre deux battements (IBI Inter Beat Intervak, durée entre deux pics de l'électrocardiogramme)

étaient réduites lors des phases d'exposition à une tâche requérant une forte demande mentale. De Waard (1996) a relevé par ailleurs que la conduite automobile était marquée par une augmentation du rythme cardiaque moyen de ses sujets, par rapport au rythme moyen en phase de repos. De plus, cette augmentation était également variable suivant les conditions de conduite, rendant cette mesure d'autant plus utile. Ainsi, la conduite sur route sinueuse ou en utilisant un téléphone mobile étaient marquées par une augmentation de la moyenne du rythme cardiaque par rapport à celui mesuré sur l'ensemble de la conduite. L'hypovigilance à l'inverse avait pour conséquence une diminution du rythme cardiaque. Avec l'utilisation de systèmes de mesure embarqués, il est possible de suivre le rythme cardiaque sous un mode quasi-continu. De Waard (1996) utilisait une fenêtre de 30 secondes, en la déplaçant sur le profil du rythme cardiaque par pas de 10 secondes, afin d'obtenir un profil de mesure plus lissé. Il a décelé ainsi des différences dans le rythme cardiaque liées à des segments de route spécifiques. La conduite sur une section à quatre voies réduisait significativement le rythme cardiaque, alors que le passage de ronds-points avait l'effet inverse. De Waard, M., Hoedemaeker et Brookhuis (1999) ont mis en évidence avec cette technique un accroissement sensible du rythme cardiaque suite à une situation d'urgence sur l'autoroute. Cet accroissement s'explique par la réaction de surprise face à une situation nouvelle.

De nombreuses études ont par ailleurs été menées pour étudier les liens entre rythme cardiaque et charge mentale chez les pilotes en utilisant un simulateur de vol. Comme mentionné précédemment, plusieurs études ont montré qu'une augmentation de la charge de travail avait pour conséquence une augmentation du rythme cardiaque chez les pilotes. Lindholm et Cheatham (1983) ont tenté de reproduire ces effets sur simulateur, afin de valider si ce dernier a un effet différent par rapport à la situation de conduite réelle, comme le pensent de nombreux pilotes. Ils ont ainsi testé des pilotes « naïfs » sur un certain nombre de phases de vol et ont montré que durant la phase d'approche finale avant l'atterrissage, la fréquence cardiaque des pilotes augmentait, tout comme leur conductance électrodermale. Selon ces auteurs, l'expérience du pilote ne semblait pas avoir d'effet sur la fréquence cardiaque.

Hasbrook et Rasmussen (1970) ont également étudié le rythme cardiaque des pilotes en simulateur. Ce rythme était mesuré durant une simulation d'approche aux instruments. Les pilotes avaient des niveaux d'expérience variés. Les résultats principaux de l'étude révèlent une augmentation significative du rythme durant chaque approche simulée. Le rythme cardiaque moyen, sur 10 approches, était relativement constant. Les rythmes cardiaques enregistrés et l'amplitude de la variation étaient en revanche bien moindres que ceux produits lors d'une situation très stressante telle que la chute libre.

Les profils de rythme cardiaque se sont révélés similaires pour les pilotes et copilotes durant les phases de décollage et d'atterrissage ainsi que durant les phases d'ascension et de descente. Le rythme cardiaque des copilotes était significativement plus élevé que celui des pilotes durant le décollage et l'atterrissage. La différence entre les périodes de contrôle et de non-contrôle de l'appareil était plus visible pour les co-pilotes que pour les pilotes. Dans le domaine automobile, des mesures du rythme cardiaque ont été faites et sont toujours populaires en tant que mesures physiologiques embarquées (De Waard, 1996 ; Meshkati, 1988). L'attractivité de l'électrocardiogramme est évidente, les électrodes sont simples à installer et la distorsion due aux mouvements physiques est limitée pour les conducteurs, contraints de toute façon à rester assis sur leur siège.

Certaines recherches (Malaterre, 1994) ont cependant mis en évidence des limites dans l'utilisation de ces mesures, sensibles à l'effort physique et à la fatigue.

La variabilité du rythme cardiaque, en revanche, est moins sensible à l'effort physique que le rythme cardiaque lui-même et plus sensible à l'effort mental. Plusieurs études ont montré que l'effort mental diminue la variabilité (Mulder, 1980 ; Vicente, Thornton et Moray, 1987), en particulier dans la bande des fréquences moyennes du spectre, qu'on nomme généralement la composante 0,10Hz. Trois bandes de fréquence ont été déterminées (Mulder, 1988, 1992) : une bande de basses fréquences (0,02-0,06 Hz), une bande de fréquences moyennes (0,07-0,14 Hz) et une bande de hautes fréquences (0,15-0,50 Hz). La bande des fréquences basses est généralement liée à la régulation de la température ; la bande des hautes fréquences est le plus souvent corrélée aux fluctuations respiratoires. La bande des fréquences moyennes, quant à elle, semble liée à l'effort, la variabilité dans cette

gamme de fréquences diminuant avec l'effort. Dans une situation de conduite par exemple, Van Winsum, Van Knippenberg et Brookhuis (1989) ont mesuré une plus faible variabilité du rythme cardiaque dans une navigation par cartes comparée à une navigation assistée vocalement. Cette diminution était visible dans la composante 0,10Hz. Les auteurs liaient cette diminution à une plus grande charge requise par la navigation à base de cartes. Janssen, Kuiken et Verwey (1994) n'ont cependant pas relevé d'effet significatif sur cette bande de fréquences lors d'une étude portant sur différents types de systèmes d'aides à la conduite. Il se peut que ce résultat ait été la marque d'une absence de variation de la charge mentale. De Waard (1996) a montré que la variabilité du rythme cardiaque pouvait être utilisé comme un indicateur fiable de l'effort mental associé à différentes tâches. L'attente à un feu se caractérise par une augmentation de la variabilité, alors que le passage d'un rond-point a pour effet une diminution de la variabilité.

2.3.3.2.1.3 La pression sanguine

La pression sanguine a été utilisée également comme mesure de la charge de travail. Des études ont mis en évidence très tôt que la pression sanguine augmentait avec la difficulté de la tâche (Wierwille et Connor, 1983). Ettema (1969) a utilisé des tâches de choix binaires, qui étaient présentées avec des fréquences variées, sur de courtes périodes. L'augmentation de la pression sanguine s'est révélée dans les phases systoliques et diastoliques. Les éléments ont été reproduits par la suite par Ettema et Zielhuis (1971). Dans une étude plus récente, Veltman et Gaillard (1998) ont mis en évidence l'effet de la charge sur la pression sanguine, ainsi que sur d'autres mesures physiologiques qui seront discutées plus tard. Les sujets devaient réaliser deux tâches d'impact différent sur la charge mentale. Une hausse de la charge conduisait à une augmentation significative de la pression sanguine.

2.3.3.2.1.4 Les mesures électrodermales

Ces mesures dépendent de l'interaction entre l'activité du système nerveux orthosympathique et de processus locaux au niveau cutané (Campagne, 2004). Elles sont sensibles aux variations des sécrétions des tissus épidermiques, telles que la respiration, ainsi qu'à d'autres influences externes. Trois mesures sont classiquement utilisées : la conduc-

tance cutanée, la résistance cutanée et le potentiel cutané. La conductance est l'inverse mathématique de la résistance. Chacun de ses signaux se subdivise en une composante tonique qui identifie les variations lentes du signal électrodermal et en une composante phasique qui correspond aux variations rapides de ce signal, variations appelées réponses électrodermales (RED). Les mesures les plus communément utilisées pour refléter cette composante phasique sont la fréquence, l'amplitude, la latence et la durée des réponses électrodermales.

La conductance cutanée

La conductance cutanée reflète la capacité de la peau à laisser passer le courant. Elle est sensible à la charge mentale des sujets. La conductance cutanée est appréciée en faisant passer un courant constant de $15\mu A$ entre deux électrodes Ag/AgCl non-polarisables de $50mm^2$ de surface, placées sur les secondes phalanges de l'index et du majeur de la main non-dominante et maintenues par de la bande adhésive. Un gel conducteur est appliqué entre la peau et les capteurs pour améliorer le contact. Elle est mesurée avec un voltage de 0,5 V. Lindholm et Cheatham (1983) ont constaté que la conductance cutanée, comme le rythme cardiaque, augmentait progressivement à mesure que les pilotes s'approchaient du moment de l'atterrissage. Bien que les données issues de ces mesures soient sensibles à d'autres facteurs, les effets relevés n'ont pas changé significativement suivant les sessions, montrant ainsi qu'ils n'étaient pas le fruit d'effets parasites. Une augmentation de la conductance reflète donc une augmentation de la charge.

La résistance cutanée

La résistance électrodermale reflète l'opposition que la peau offre au passage du courant. La résistance cutanée est appréciée en faisant passer un courant constant de $15\mu A$ entre deux électrodes Ag/AgCl non-polarisables de $30mm^2$ de surface, placées sur les secondes phalanges de l'index et du majeur de la main non-dominante et maintenues par de la bande adhésive. Un gel conducteur est appliqué entre la peau et les capteurs pour améliorer le contact. Concernant l'étude du niveau de l'activation, une augmentation de la résistance cutanée traduit une relaxation du sujet et inversement, une diminution de la résistance signifie que le sujet s'active. Concernant l'étude de l'effet d'un stimulus, l'indice

temporel le plus pertinent est la Durée de la Perturbation Ohmique pour la résistance (DPO) élaboré par Vernet-Maury (1991). La DPO en résistance est mesurée dès le début de la brusque baisse provoquée par la stimulation. Elle est suivie par des fluctuations à un niveau inférieur au niveau tonique précédant la stimulation et se termine lorsque la reprise n'est plus marquée par des fluctuations, c'est à dire lorsque la pente de la courbe ressemble à celle observée avant la stimulation (voir figure 2.1). La DPO est ainsi définie comme la durée pendant laquelle le sujet reste sous l'effet de la stimulation.

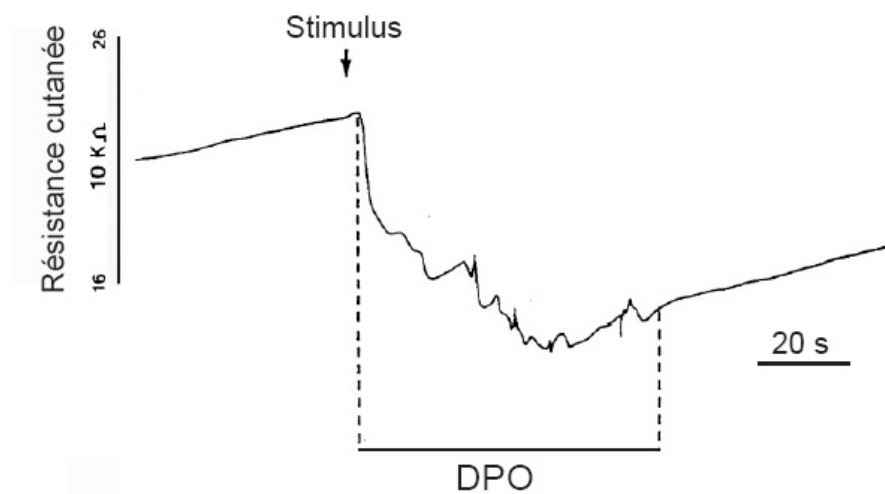


FIG. 2.1 – Méthode de mesure de la Durée de la Perturbation Ohmique lors d'une réponse de la résistance cutanée

La modification de la résistance cutanée, tout comme celle de la conductance, est sous l'entière dépendance du système nerveux orthosympathique, connu lui-même pour mobiliser les ressources énergétiques en réponse aux demandes du milieu intérieur et extérieur en vue de faire face aux situations d'urgence (Dell, 1985) ; c'est son activation qui réduit la résistance cutanée. Dans une étude réalisée en situation de conduite automobile, le niveau de résistance tonique a permis de différencier deux populations de conducteurs confrontés à une situation d'évitement de choc. Ceux qui ont réussi à éviter un choc, en réalisant la manoeuvre appropriée, avaient une résistance cutanée plus basse avant la situation d'urgence que ceux qui n'ont pas réussi à l'éviter (Priez, Petit, Tarriere, Dittmar et Vernet-Maury, 1992).

Dans une étude portant l'action ou l'inhibition de l'action qui utilisait le paradigme Go/No Go, Collet, Dittmar et Vernet-Maury (1999) ont montré que la durée des réponses électrodermales en résistance était significativement plus longue lors de l'action que lors de l'inhibition de l'action.

Le potentiel cutané

Le potentiel cutané est enregistré à l'aide d'électrodes auto-adhésives Beckmann, de $78mm^2$ de surface active et reflète l'activité électrique spontanée de la peau. L'électrode active est positionnée sur l'intérieur du poignet de la main non-dominante et l'électrode de référence, 10 cm plus haut sur l'avant-bras (Fowles, Christie et Edelberg, 1981). Un gel conducteur est appliqué entre la peau et les capteurs pour améliorer le contact. La quantification des variations du potentiel est effectuée en utilisant un indice présentant l'avantage d'être indépendant du niveau de base : le Système de Décodage de la Réponse Electrodermale (SYDER) qui permet de classifier les réponses élémentaires selon leur forme, leur signe et leur durée (Dittmar, Saumet et Vernet-Maury, 1985; Dittmar, Delhomme, Caterini et Vernet-Maury, 1991). Trois formes élémentaires (A,B et C) peuvent être ainsi obtenues comme le montre la figure 2.2

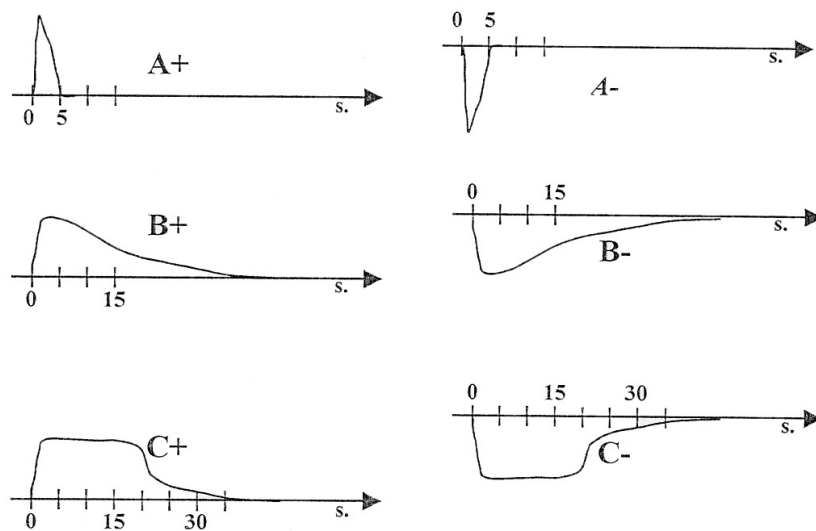


FIG. 2.2 – Systèmes de décodage de la réponse électrodermale en potentiel

Le changement de valence des réponses du potentiel, pour un même niveau basal, est

corrélé à une augmentation de la charge de travail (Vernet-Maury, 1996).

Ces mesures peuvent refléter différents aspects des processus mentaux. Par exemple, une augmentation de la durée du temps de retour à la ligne de base des RED tend à refléter la focalisation de l'attention (Boucsein, 1992, 1993), l'amplitude de la RED augmente avec l'intensité du stimulus ou avec l'augmentation de la charge attentionnelle (Frith et Allen, 1983). En outre, la fréquence et l'amplitude sont plus élevées lorsqu'un stimulus est signifiant comparativement à un stimulus non-signifiant (Berstein, 1969). Williges et Wierwille (1979) ont montré un lien entre l'activité électrodermale et la charge mentale. Elle est sensible au niveau d'éveil, à la charge attentionnelle (que ce soit les changements à court terme du niveau global de l'attention du sujet que l'intensité de focalisation de l'attention vers une classe de stimuli particulière), à la charge émotionnelle (qui correspond au contrôle de la réactivité émotionnelle qui peut influencer la performance au cours de la tâche), aux émotions et à la motivation mais aussi aux exigences motrices de la tâche à réaliser. Ces mesures rendent également compte de la durée de traitement de l'information et de la préparation de l'activité motrice (pour revue, voir Collet, 1995, 2002). Concernant les émotions, Collet, Dittmar, Vernet-Maury (1997) ont comparé deux à deux les six émotions de base (la peur, la colère, la joie, la tristesse, le dégoût et la surprise). Les sujets devaient mimer les émotions qui leur étaient présentées sur des portraits d'acteurs professionnels et tenter de les ressentir en référence à des événements personnels passés. Treize paires sur quinze ont pu être séparées par les paramètres de la réponse électrodermale (la joie n'a pas pu être distinguée de la colère, ni la tristesse du dégoût).

Dans une étude portant sur les contrôleurs aériens (Collet, Averty, Dittmar et Vernet-Maury, 2002), les variations de la charge de travail étaient corrélées avec les modifications de l'activité tonique du système nerveux végétatif et les variables les plus robustes étaient la conductance cutanée et la fréquence cardiaque. Une corrélation positive était en outre observée entre la charge de travail et le potentiel cutané ainsi qu'une corrélation négative entre la charge de travail et le débit sanguin cutané. Ainsi, une relation linéaire a été mise en évidence entre l'augmentation de la charge de travail et les variables végétatives de la

population observée.

Concernant la quantification de la charge mentale en conduite automobile, différentes études ont utilisé les réponses électrodermales. Dans une étude menée sur piste, Priez, Petit, Brigout, Collet, Vernet-Maury et Dittmar (1998) proposaient trois types de tâches à trois types de sujets différents. La première consistait à négocier un virage dont la courbure a été accentuée à l'insu des sujets, la seconde en une manoeuvre entre obstacles après un obstacle sur la voie de circulation du conducteur (Appel/contre-appel, autrement dit deux braquages de volant successifs, en sens inverse) et la troisième en une tâche d'évitement de choc à vitesse élevée. L'analyse des réponses en résistance cutanée montrait que leur durée (DPO) augmente avec la complexité de la tâche.

Dans une autre étude visant à évaluer la perception des freinages d'urgence et l'impact de l'installation d'un système d'ABS dans un véhicule, Priez, Petit et Brigout (2001) ont mesuré les variations de la réponse électrodermale mesurée à la surface de la peau, plus particulièrement la résistance et le potentiel électriques cutanés. L'expérimentation a eu lieu sur piste. Les 100 sujets n'étaient pas prévenus qu'ils seraient placés dans une situation d'urgence. Ils devaient diminuer leur vitesse (de 80 à 50 km/h ou de 50 à 30 km/h) ou s'arrêter (de 80 ou 50 à 0 km/h). Toutes ses situations de décélération (théoriquement comprises entre 0,1 et 0,6 g) étaient présentées à tous les conducteurs. En outre, à la fin du test, ils étaient confrontés à une situation d'urgence où ils devaient freiner très fort (1,2 g) pour éviter un obstacle soudain sur leur voie. La fréquence des réponses en résistance augmente significativement avec l'importance du freinage : des réponses phasiques étaient enregistrées dans 67 % des situations de décélération de 50 à 30 km/h, dans 83 % des situations de décélération de 50 à 0 km/h et dans 100 % des situations d'urgence. La DPO augmente également significativement ($p < 0,0001$) dans les situations de freinage appuyé (de 80 à 0 km/h) ou dans les situations d'urgence. De même, les potentiels enregistrés montrent une différence significative ($p < 0,0001$) entre les freinages confortables, appuyés ou d'urgence. Les actions habituelles de conduite ne provoquent pas ou peu de réponses émotionnelles et cette charge émotionnelle augmente avec la criticité et l'urgence de la situation. Selon ces auteurs, les réponses électrodermales permettent de quantifier objec-

tivement la charge émotionnelle liée à une situation précise et de différencier nettement le processus d'analyse entre un freinage appuyé, un freinage d'urgence et un freinage standard, déjà générateur d'un processus cognitif non négligeable par rapport à la conduite nominale. Ainsi, le potentiel serait davantage lié à la charge émotionnelle tandis que la résistance serait davantage liée aux processus attentionnels.

Ces résultats sont corroborés par ceux obtenus dans les études menées par Campagne dans le cadre de sa thèse (2004). Elle s'est intéressée à « l'incidence de contextes de conduite différents sur l'état électrodermal du conducteur selon le degré de complexité de la tâche, son degré de responsabilité et en présence ou non d'un passager familiarisé ou non avec les différentes situations de conduite. Les résultats de ses recherches montrent qu'un lien existe entre l'activité électrodermale et les processus perceptifs et cognitifs induits par les différentes situations de conduite rencontrées ainsi que les différentes modalités des tâches réalisées. Les modifications des paramètres électrodermaux permettent de rendre compte de l'état d'activation, du traitement des données sensorielles et des réponses motrices des sujets ainsi que des charges mentales et affectives qui sont induites par la conduite automobile. L'activité électrodermale montre une sensibilité de plus en plus fine selon le caractère émotionnelle ou attentionnel des situations de conduite avec la complexification de la tâche et la mise en place de comportements adaptés et spécifiques à chaque situation de conduite. Elle atteste également d'une interaction physiologique entre le conducteur et le passager. L'influence du sexe et de l'âge reste, en revanche, limitée. »

2.3.3.2.1.5 L'électromyogramme (EMG)

Cette méthode permet de mesurer l'activité électrodermale due aux potentiels électriques des muscles. Elle mesure donc l'activité ou la tension musculaire et offre le choix à l'expérimentateur de l'emplacement de électrodes et donc des groupes musculaires à étudier. Par exemple, une étude menée par Wisner (1973) a permis de mettre en évidence une tension des muscles de la nuque sous l'effet de la charge de travail. En revanche, des électrodes placées sur l'avant bras n'ont montré aucune relation entre ces muscles et la charge mentale (Spyker, Stackhouse, Khalafalla et McLane, 1971).

De Waard, Jessurun, Steyvers, Raggatt et Brookhuis (1995) ont voulu évaluer l'effet

du tracé et de l'environnement routiers sur la performance de conduite, des mesures physiologiques (EMG facial) et l'appréciation de la route par les conducteurs. Un effet de la conduite par rapport au repos et un effet de deux différents environnements ont pu être mis en évidence, mais aucun effet de la charge mentale induite par le tracé routier n'a été observé. Dans la mesure où la composante à 0,10 Hz de la variabilité du rythme cardiaque est sensible à la différence attendue de la charge mentale entre le parcours routier expérimental et le parcours routier témoin et où l'activité EMG faciale ne l'était pas, les auteurs ont conclu que ces mesures devaient mesurer différentes dimensions de la charge de travail. Selon ces auteurs, aucune étude expérimentale n'a porté sur la sensibilité différentielle à la charge mentale de ces deux mesures. Ainsi, la validité de cette méthode reste à prouver car certains résultats se contredisent au sujet de l'utilisation des EMG comme mesure de la charge de travail.

2.3.3.2.1.6 La tension musculaire

La mesure de la tension musculaire s'intéresse à la façon dont certains muscles se tendent avec l'accroissement de la charge. Comme indiqué précédemment, les muscles de la nuque se contractent sous l'effet de la charge (Wisner, 1973). Un mécanisme similaire se manifeste pour les muscles de la main (Jex et Allen, 1970). Cependant, lorsque les sujets sont fatigués ou stressés, ils peuvent contracter leurs muscles pour faciliter leur concentration ou pour compenser leur fatigue. De ce fait, les contractions ne sont pas imputables à une augmentation de la charge.

2.3.3.2.1.7 Les mesures oculaires

O'Donnell et Eggemeier (1986) ont montré que le diamètre de la pupille, le nombre de clignements des paupières et la direction du regard pouvaient être utilisés comme indicateurs de la charge mentale.

Dilatation de la pupille

La mesure de la dilatation de la pupille se base sur l'évaluation de la taille de la pupille. Plusieurs études ont montré que cette mesure était révélatrice d'une augmentation de la charge (Bradshaw, 1968 ; Kahneman, Beatty et Pollack, 1967). Une étude a montré que le

diamètre de la pupille s'accroît effectivement jusqu'au niveau de « surcharge » mais qu'au delà la pupille se contracte (Williges et Wierwille, 1979). Dans une étude plus récente, le diamètre de la pupille était le seul indicateur reflétant des variations de la charge associée à des communications. Cependant, les systèmes utilisés pour mesurer le diamètre des pupilles n'étaient pas très précis (Casali et Wierwille, 1983) et cette mesure ne peut être utilisée durant la conduite en raison de sa haute sensibilité à la lumière. Cette mesure est très contraignante pour le sujet et elle ne peut être utilisée qu'en laboratoire, avec une luminosité constante.

Clignement des paupières

L'électro-oculogramme (EOG) permet de mesurer le clignement des paupières. Des électrodes sont placées au dessus et au dessous de l'œil. Veltman et Gaillard (1998) ont ainsi mesuré les clignements de l'œil gauche des pilotes confrontés à des tâches variées. L'intervalle de clignement diminuait avec l'augmentation de la difficulté de la tâche. Hankins et Wilson (1998) ont également montré que le nombre de clignements varie avec la charge. Face à une charge visuelle, les fréquences de clignement se réduisent et selon Wilson, Fullenkamp et Davis (1994), le clignement des paupières serait inversement corrélé à la charge mentale associée à des tâches impliquant des stimulines auditifs. De même, le nombre de clignements diminue lorsque la charge augmente (Hancock et Parasuraman, 1992).

Saccades oculaires

Les mouvements des yeux et des paupières sont souvent associés à des saccades oculaires. L'écoute attentive a généralement pour effet de réduire le nombre de mouvements oculaires. En conduite automobile, le nombre et la durée des fixations peuvent être mesurés en tant qu'indicateurs des stratégies de prise d'information et de partage d'attention entre les diverses sources.

2.3.3.2.1.8 La fréquence critique de fusion

Cette mesure correspond à la plus basse fréquence à partir de laquelle une source de lumière clignotante est perçue comme constante par un sujet. La fréquence critique de

fusion varie généralement entre 15 et 60 pulsations par seconde. Lorsque cette mesure est utilisée pour mettre en évidence la charge mentale, elle est prise soit en parallèle de l'accomplissement de la tâche, soit avant et après l'exécution de celle-ci. Cette mesure peut être influencée par la fatigue ou l'expérience. Des résultats contradictoires ont été mis en évidence sur la précision de cette mesure (Williges et Wierwille, 1979). Certains ont ainsi montré une corrélation avec la charge (Jenney, Older et Cameron, 1972) alors que d'autres n'ont trouvé aucun résultat significatif (Guttman, Easterling et Webster, 1972).

2.3.3.2.1.9 Analyse de la respiration

Bien que la façon dont une personne respire ne soit pas souvent utilisée comme indicateur de la charge mentale, certains aspects de la respiration ont un intérêt pour la mesure de celle-ci (Veltman, 1991). Avec l'accroissement de la charge, le profil de la respiration change : les sujets commencent à respirer plus vite et plus profondément. Cela peut induire un accroissement de l'émission de CO₂ par le corps (hyperventilation), pouvant conduire à des vertiges. La respiration est également liée à la variabilité du rythme cardiaque. Un accroissement de la fréquence respiratoire diminue la variabilité du rythme cardiaque. Par ailleurs, une respiration plus profonde s'accompagne d'un accroissement de la variabilité. Par conséquent, l'analyse du profil respiratoire est un outil important dans l'interprétation de la variabilité du rythme cardiaque.

Plusieurs études (Sammer, 1998 ; Sun, Keane et Stackhouse, 1976) se sont intéressées à l'effet qu'a la charge sur la fréquence respiratoire. Plusieurs techniques sont utilisables : en plaçant une résistance thermique dans les narines, en mesurant la circonférence de la poitrine en temps réel, ou en mesurant la quantité d'air inspiré et expiré (Williges et Wierwille, 1979). Cependant, ces méthodes ont comme point commun leur caractère intrusif qui peut modifier le comportement du conducteur. Les méthodes précédentes ont mis en évidence un accroissement du rythme respiratoire avec l'accroissement de la charge. Cependant, cet accroissement peut être dû à d'autres facteurs tels que le stress (Williges et Wierwille, 1979). L'analyse de la respiration doit donc toujours être utilisée en complément d'autres mesures (Wilson, Fullenkamp et Davis, 1994).

2.3.3.2.1.10 Analyse des fluides corporels

Cette méthode se fonde sur l'analyse de plusieurs fluides corporels afin de déterminer si certains sont affectés par la charge de travail. Les deux fluides les plus couramment utilisés sont la salive et l'urine. Les mêmes composants sont généralement recherchés dans chacun d'entre eux. Par exemple, Storm, Hartman, Intano et Peters (1976) se sont intéressés au taux de sodium chez des pilotes et ont détecté une augmentation de ce taux entre les phases, avant et après le vol.

Les taux de certaines hormones comme l'adrénaline, la noradrénaline et le cortisol sont généralement utilisés pour étudier la charge de travail. L'adrénaline est sensible à la charge physique comme à la charge mentale. La noradrénaline est associée plus spécifiquement à l'activité physique et se révèle moins appropriée pour mesurer la charge mentale (Meijman, 1989). On l'utilise indirectement pour construire un indicateur de la « charge mentale pure », en divisant le taux d'adrénaline par le taux de noradrénaline. Ces mesures se basent sur des analyses d'urine toutes les deux heures. Elles ne sont par conséquent pas utilisables pour mesurer les pics de charge.

Le cortisol est présent dans le sang et dans la salive, en concentrations corrélées (Vining, McGinley, Maksvytis et Ho, 1983). Le taux de cortisol voit sa concentration augmenter dans l'organisme des sujets soumis à la panique ou à des émotions très négatives (Veltman, 1991). C'est le cas notamment lorsqu'un sujet est soumis à une tâche difficile sur laquelle il n'a aucun contrôle (Frankenhaeser et Johansson, 1986).

Dans une étude concernant des pilotes et des co-pilotes, les auteurs ont observé que le taux de cortisol était plus élevé environ 20 minutes après le décollage et l'atterrissage et plus bas durant la phase de croisière. Des différences dans l'augmentation du taux de cortisol et du rythme cardiaque du pilote et du copilote ont été mises en évidence. Alors que pour les copilotes, le taux de cortisol était plus élevé que celui des pilotes durant le décollage et l'atterrissage, pour les pilotes, il était plus élevé que celui des co-pilotes durant la phase de croisière. Les variations du taux de cortisol et du rythme cardiaque reflétaient les variations du niveau de difficulté au cours du vol (Kakimoto, Nakamura, Tarui, Nagasawa et Yagura, 1988). Une plus forte concentration de cortisol est indicatrice

d'une charge plus élevée, mais également de phénomènes associés, tels que le stress. Par conséquent, il n'est pas recommandé d'utiliser le taux de cortisol comme mesure unique de la charge, mais son usage peut être utile comme complément d'autres indicateurs.

Cependant, ces mesures sont passablement intrusives et ces fluides sont sujets à de multiples influences (le stress, par exemple). Attribuer une variation de leur composition à la charge de travail seule n'est pas correct.

2.3.3.2.1.11 Conclusion

Parmi les indicateurs étudiés, seuls les potentiels évoqués cérébraux mesurent directement l'attention spécifique portée à un stimulus donné. Cependant, il est possible également possible de mesurer l'activité du SNC par l'intermédiaire de ses manifestations végétatives périphériques, au niveau du SNA (Collet, 1995). De nombreuses études ont en effet montré que l'activité électrodermale, les variations de la pression sanguine et de l'activité cardio-respiratoire constituaient des indicateurs fonctionnels des relations existantes entre les systèmes nerveux central et autonome (pour revue, voir Collet, 1995). Les relations mises en évidence sont structurales et fonctionnelles. Les données issues de recherches neuro-anatomiques ont été mises en évidence des relations anatomo-fonctionnelles entre le SNC et le SNA. Elles ont en effet établi des relations non-équivoques entre diverses structures centrales et l'expression neurovégétative périphérique de certaines fonctions. La stimulation électrique ou chimique du cortex insulaire provoque une réduction parasympathique de la pression sanguine et de la fréquence cardiaque. Par ailleurs, la destruction de l'une des structures centrales entraînera la perturbation, voire la disparition de certaines fonctions neuro-végétatives périphériques. Par exemple, une atteinte préfrontale entraîne des modifications de la réponse électrodermale, de la température cutanée et de la pression artérielle (Collet, 1995). Les données issues de l'électrophysiologie ont mises en évidence des relations de covariations entre les fonctions du SNC et du SNA par l'analyse simultanée de l'activité électrique corticale (EEG) et de variables neuro-végétatives cutanées ou cardio-respiratoires. Par exemple, Beyer, Weiss, Hansen, Wolf et Seidel (1990) ont montré une évolution commune des variables électroencéphalographiques et neuro-végétatives. La fréquence moyenne de l'activité α sur le lobe occipitale gauche et sur l'aire pariétale était

plus importante pendant la phase d'imagerie que pendant la phase de repos. De même, les fréquences cardiaques et respiratoires, ainsi que la conductance, augmentaient elles-aussi. Les relations entre les potentiels événementiels (ERP) et les indices neuro-végétatifs ont le plus souvent été étudiés à travers la réponse d'orientation qui correspond à une augmentation de l'éveil physiologique lors de la présentation de stimuli qui peuvent avoir des entrées sensorielles diverses (Sokolov, 1975). Elle consiste en un choix des informations à traiter au détriment de toutes celles qui n'ont pas pour le sujet une importance actuelle (voir Chapitre 1). Le SNC doit donc effectué un tri à chaque instant afin d'orienter son activité vers des entrées sensorielles définies, qui changent au gré de l'urgence. Dans un même temps, cet éveil spécifique qui oriente l'activité du SNC, se traduit par des manifestations faciles à enregistrer : vasoconstriction, augmentation de la fréquence cardiaque et de la conductance cutanée (Collet, 1995). Ainsi, des processus liés à la réponse d'orientation, quoique différents, peuvent être mesurés en utilisant des indices centraux et périphériques (Näätänen, 1986, 1988).

Dans un contexte automobile, ces mesures peuvent être utilisées dans la mesure où, toute chose étant égale par ailleurs, leur variation peut être rattachée à un événement mais, comme leur définition temporelle est faible, il subsiste une ambiguïté qui ne peut être levée : les variations sont-elles dues à la perception de l'alerte ou à celle de l'évènement de la scène routière lui-même ? Ainsi, on peut conclure avec Williges et Wierwille (1979) que pour la plupart de ces mesures, une corrélation avec les processus attentionnelles et émotionnelles a pu être établie, mais que la méthode la plus efficace est sans doute d'utiliser simultanément plusieurs d'entre elles. De nombreuses mesures sont disponibles, avec différents taux de succès et de sensibilité. Il est par conséquent préférable d'utiliser une batterie de tests combinés pour mesurer la charge mentale.

2.3.3.2.2 Mesures subjectives

On regroupe sous cette appellation les mesures obtenues par interrogation des sujets, à qui on demande par exemple d'évaluer a posteriori la difficulté d'une tâche, la pression temporelle, etc. Cette évaluation peut se décliner sous des modes variés : batteries d'échelles de mesure, évaluations graduées, évaluations comparatives, questionnaires

(comprenant des questions ouvertes ou fermées), portant sur une ou plusieurs dimensions (Williges et Wierwille, 1979). Les mesures subjectives sont souvent utilisées pour évaluer la charge mentale. Elles sont faciles à réaliser et sont peu intrusives ; cependant, certains inconvénients doivent être pris en compte lors de leur utilisation. Tout d'abord, les résultats sont obtenus à la fin d'une période donnée et non de façon continue. En outre, seuls les effets conscients sont ainsi mis en évidence. De nombreux auteurs les recommandent cependant comme mesures d'appoint (O'Donnell et Eggemeier, 1986) et précisent qu'elles ne doivent pas être utilisées seules.

Ces mesures ont longtemps séduit les chercheurs pour leur facilité de recueil, mais aussi, selon certains auteurs, parce que personne n'est mieux placé que le sujet lui-même pour donner un jugement précis sur la charge mentale associée à une tâche qu'il effectue (Wickens, 1984). Cependant, d'autres chercheurs pensent que l'origine de la charge de travail selon une dimension précise est difficile à évaluer par introspection. Selon eux, la charge physique et la charge mentale sont difficiles à séparer (O'Donnell et Eggemeier, 1986). Enfin, un autre problème avec ces mesures est que, si elles sont réalisées après la tâche à évaluer, certains effets de la charge mentale risquent de ne pas être mis en évidence. Ainsi, de nombreux auteurs recommandent ces mesures comme mesures complémentaires. Par exemple, Muckler et Seven (1992) affirment que la force de ces mesures est leur subjectivité : le rôle particulier des mesures subjectives tiendrait au fait (contestable) que l'utilisateur est en mesure d'évaluer ses propres performances. Il peut les évaluer, en effet, et même il ne s'en prive pas, mais de façon peu précise et souvent très influencée par d'autres facteurs (par exemple le contexte). Différentes dimensions de la charge mentale, comme la performance et l'effort, sont intégrées dans les mesures subjectives, tout en prenant en compte les différences individuelles, les différents états de l'opérateur, ses comportements, contrairement aux mesures objectives qui ne le permettent pas, sauf quand la variation est telle qu'elle impacte fortement les mesures de performance.

Les mesures subjectives sont très nombreuses, mais seules les plus courantes seront abordées dans le cadre de cette thèse.

2.3.3.2.2.1 Les batteries d'échelles de mesure

Les échelles de mesure sont souvent utilisées dans les recherches. Elles consistent à demander aux sujets d'évaluer par une note leur niveau de charge mentale, sur plusieurs échelles de mesure. Ces mesures sont souvent employées car elles sont faciles à utiliser, peu intrusives et relativement sensibles aux variations de charge mentale si elles sont réalisées peu de temps après la tâche à évaluer. Cependant, un inconvénient de ces mesures est qu'elles dépendent des jugements subjectifs des sujets qui peuvent être affectés par leurs attentes, particulièrement lorsque les consignes concernant la manière de répondre ne sont pas suffisamment précises. Ainsi, les échelles de mesure sont adaptées pour mesurer la charge mentale globale sur de longues périodes de temps plutôt que pour détecter des variations de la charge, sur de courtes périodes.

Les trois échelles de mesures les plus courantes sont la SWAT (Subjective Workload Assessment Technique), le NASA TLX (NASA Task Load Index) et la MCH (Modified Cooper-Harper Scale). Le TLX et la SWAT sont des échelles multi-dimensionnelles : les échelles sont divisées en sous-échelles qui concernent différents domaines (charge physique, pression temporelle, etc.) afin d'obtenir une mesure de la charge de travail (Gawron, 2000)

La « Subjective Workload Assessment Technique » (SWAT)

La SWAT est une échelle de mesure multi-dimensionnelle de la charge de travail. Elle mesure cette charge selon trois dimensions : la pression temporelle (time stress), l'effort mental (mental effort) et la contrainte psychologique (psychological stress) (Reid et Nygren, 1988). Dans sa forme originale, la SWAT consistait en une tâche de tri de cartes dans laquelle 27 échelles de mesure devaient être classées. Le principal inconvénient de cette échelle est le temps relativement long nécessaire à la réalisation du tri de cartes. Une version plus simple a été mise en place, utilisant une échelle unique et donnant des résultats comparables à la version initiale. Un nombre considérable d'études a utilisé cette mesure et l'a trouvée valide. En revanche, elle est quelque peu versatile. Elle a été utilisée en simulateur (Bateman et Thompson, 1986 ; Hancock, Williams, Manning et Miyake, 1995) ou durant un vol réel (Corwin, 1992 ; Haskell et Reid, 1987).

Cowin (1992) a utilisé la SWAT pour mesurer la charge des pilotes durant sept périodes du vol, dont le décollage, l'atterrissage et la prise d'altitude. Cette évaluation était faite

par des pilotes de sexe masculin, ayant cinq ans d'expérience, pendant le vol ou après le vol. La charge évaluée après le vol par la SWAT était plus faible que celle évaluée durant le vol. Cependant, il faut noter que la SWAT était passée oralement durant le vol, alors qu'elle l'était par écrit après le vol. Les pilotes étaient peut-être moins enclins à admettre leur vraie charge oralement durant le vol qu'après avoir fini leur travail. Enfin, les pilotes avaient tous cinq ans d'expérience, ces résultats ne peuvent donc pas être généralisés à l'ensemble des pilotes, car les pilotes ayant moins d'expérience généreraient peut-être moins facilement la charge de travail.

La SWAT a également été utilisée pour évaluer un système d'assistances multiples à la conduite automobile, sur simulateur et sur route réelle (Janssen, Kuiken et Verwey, 1994). Le système comprenait une aide à la navigation, une aide concernant le respect de la vitesse, un collision warning et un lane keeping (sur simulateur uniquement). Une version adaptée de la SWAT, dans laquelle le tri de cartes a été mis de côté, a été utilisée. Les auteurs utilisaient l'index de la charge mentale globale, en additionnant trois échelles à trois points concernant la pression temporelle, l'effort mental et la contrainte psychologique. Ils obtenaient ainsi une note allant de 3 à 9. Les résultats ont montré une différence entre la conduite avec le système et celle sans assistance, aussi bien pour les expérimentations sur simulateur que celles en conduite réelle.

Durant des expérimentations sur route réelle, Verwey et Veltman (1995) ont montré que la version simplifiée de la SWAT était aussi sensible à une variation de la charge que la RSME (voir plus loin). L'utilisation de la tâche du tri de cartes n'accroît pas la précision de l'évaluation de la charge mentale (De Waard, 1996).

Le NASA Task Load IndeX (NASA TLX)

Le NASA TLX (Hart et Staveland, 1988) est une échelle multi-dimensionnelle qui mesure une évaluation subjective de la charge de travail selon six facteurs : la demande mentale (« mental demand »), la demande physique (« physical demand »), la pression temporelle (« temporal demand »), la performance, l'effort et le niveau de frustration. Les sujets doivent noter leur niveau de charge sur une échelle de 0 à 100 et noter l'importance relative des différents facteurs. C'est une des mesures subjectives de la charge de travail

les plus utilisées. C'est une synthèse de l'évaluation des comportements et des réponses subjectives, on retrouve les composantes physiques, cognitives et émotionnelles (Gawron, 2000).

Dans le but d'obtenir une évaluation de la charge de travail globale avec le NASA TLX, les échelles doivent tout d'abord être comparées entre elles, pour chacune des tâches et l'opérateur doit dire quelles sont les deux dimensions qui contribuent le plus à sa sensation de charge de travail. Cela nécessite au total quinze comparaisons avant que la charge de travail globale puisse être calculée (De Waard, 1996).

Le NASA TLX est utile pour mesurer la charge de travail sur une longue période de temps, mais n'est pas approprié pour détecter les pics de charge, ni les faibles variations durables de charge. Le NASA-TLX est sensible aux variations de charge de travail dans de nombreuses études concernant la conduite automobile. Il est admis qu'une charge élevée affecte la sécurité du conducteur, même si la relation entre la performance au NASA-TLX, le comportement du conducteur et les incidents critiques n'a pas été démontrée expérimentalement. Ainsi, les détails concernant la validité de cette mesure doivent encore faire l'objet de recherches. Néanmoins, comme le NASA-TLX est sensible à l'augmentation de charge dans les différentes études, il est considéré comme une méthode fiable de l'évaluation de la charge de travail.

De nombreuses études ont utilisé cet index pour évaluer la charge de travail dans le domaine de l'aéronautique (Hankins et Wilson, 1998 ; Hendy, Hamilton et Landry, 1993 ; Moroney, 1999 ; Moroney, Biers et Eggemeier, 1995 ; Wolffsohn, Edgar, Stone, Williams et McBrien, 1999). Les différentes échelles du NASA-TLX permettent d'appréhender les différents facteurs de charge. Wolffsohn et al. (1999) ont utilisé sept facteurs du NASA-TLX : l'effort mental, l'effort physique, la pression temporelle, l'effort global, la performance, la frustration, la charge globale. Les résultats pour les différentes échelles sont cohérents : la note augmente lorsque la charge augmente.

D'autres études ont utilisé le NASA-TLX en complément d'autres mesures, comme les mesures physiologiques. Selon Hankins et Wilson (1998), alors que les scores au NASA-TLX augmentent avec la charge de travail, ils n'étaient pas fortement corrélés à la fré-

quence cardiaque, ni aux mouvements horizontaux des yeux, ni à l'EEG.

Les résultats obtenus lors des nombreuses études comparant le NASA-TLX et la SWAT sont contradictoires. Certaines études ont montré que le NASA-TLX est plus sensible aux variations de charge de travail que d'autres échelles multi-dimensionnelles comme la SWAT ou la MCH (Hill, Iavecchia, Byers, Bittner, Zaklad et Christ, 1992). Si l'on prend en compte le protocole de recueil de données, la SWAT est plus simple, cependant le traitement est plus laborieux (Vidulich et Tsang, 1985). Enfin, dans des études utilisant le NASA-TLX et la SWAT durant une tâche de suivi (« tracking task »), Hancock et al. (Hancock, 1996 ; Hancock, Williams, Manning et Miyake, 1995) ont obtenu des résultats très similaires pour les deux échelles, contrairement à Battiste et Bortolussi (1988).

Dans le milieu automobile, peu d'études réalisées sur route réelle ont utilisé les échelles de mesure subjective. Fairclough, Ashby, Ross et Parkes (1991) ont utilisé le NASA-TLX. Ils ont observé une augmentation de la charge globale dans la condition de double tâche qui consistait à mener une conversation tout en conduisant, comparativement à la conduite seule. Le NASA-TLX a également été utilisé par Vaughan, May, Ross et Fenton (1994) dans une étude où les sujets devaient détecter des messages qui étaient présentés sous trois formes : un message auditif seul, un message auditif associé à un message visuel affiché ponctuellement (15 secondes) sur un écran ou un message auditif associé à un message visuel affiché en continu sur un écran. Les scores obtenus étaient plus élevés dans les deux premières conditions. Ces résultats mettent en évidence la « diagnosticité » du NASA-TLX, puisque les scores étaient plus élevés dans les conditions où la pression temporelle était plus élevée.

Enfin, le DALI (Driving Activity Load Index) est un index dérivé du NASA-TLX et créé par l'INRETS-LESCOT, pour les besoins du projet CARMINAT. Il comporte les mesures suivantes : l'effort attentionnel, la demande visuelle, la demande auditive, la pression temporelle, l'interférence avec la conduite, le stress situationnel. Cette méthode sert à évaluer la charge générée par l'utilisation d'un système embarqué. Elle n'est pas fiable pour évaluer la charge de travail générée par la tâche de conduite.

La « Modified Cooper Rating Scale »(MCH)

La MCH est une échelle uni-dimensionnelle pour laquelle une série de questions donne directement une note. Elle comprend dix items que l'on additionne (Cooper et Harper, 1969). Dans l'aviation, les items concernent l'adéquation de la tâche, les caractéristiques de l'appareil et la charge que la tâche concernée induit chez le pilote.

Casali et Wierwille (1983) ont observé que cette échelle était très sensible à la charge de travail quand la passation se faisait juste après un vol de courte durée. Les consignes pour remplir cette échelle étaient expliquées une première fois aux pilotes juste avant le vol. Ainsi, lors de la passation à la fin du vol, ces consignes étaient connues. Mais, cette méthode est moins efficace pour les vols de longue durée.

Cette échelle est presque exclusivement utilisée dans l'aviation mais elle pourrait être utilisée dans d'autres domaines pour évaluer la charge de travail si la tâche concernée consiste à gérer la difficulté (Gawron, 2000). Cependant, même si la MCH est sensible aux variations de difficulté d'une tâche, sa validité doit encore être démontrée expérimentalement. Des études comparatives portant sur les différentes mesures subjectives ont montré que la MCH était moins valide et moins sensible aux variations de charge que la SWAT, le NASA-TLX ou la « Rating Scale Mental Effort »(RSME). Enfin, comme les autres échelles de mesure subjectives, la MCH n'est pas appropriée pour mesurer les pics ponctuels de charge durant la conduite.

La « Rating Scale Mental Effort »(RSME)

Cette échelle, développée par Zijlstra et Van Doorn (1985), est une échelle uni-dimensionnelle. Le sujet doit représenter son effort investi en plaçant une croix sur une ligne continue, allant de 0 à 150 mm et où tous les 10 mm sont indiqués. A certains de ces repères correspondent des indications : absolument aucun effort (« Absolutely no effort »), presque aucun effort (« almost no effort »), effort faible (« a little effort »), effort modéré (« some effort »), effort moyen (« rather much effort »), effort notable (« considerable effort »), effort important (« great effort »), effort très important (« very great effort »), effort extrême (« extreme effort »). La note est obtenue par la distance en millimètres entre le point d'origine 0 et la croix faite par le sujet. Pour cette échelle, seul l'effort investi dans la tâche doit être indiqué, des notions plus abstraites de la charge de travail comme

la « demande mentale » du NASA-TLX sont mises de côté. Cela fait de la RSME une bonne mesure subjective (De Waard, 1996).

Dans le milieu automobile, la RSME a été utilisée dans une étude sur simulateur concernant le téléphone de voiture (De Waard, 1996). Les effet d'un sédatif (Triplidine) ou de l'alcool, via la RSME et l'impact sur le temps passé à la réalisation de la tâche (Time-on-task) ont été comparés. Dans tous les cas, la RSME était capable de distinguer les situations particulières et la situation de conduite normale. Une augmentation de l'effort était notable dans le cas de l'utilisation d'un téléphone en conduisant.

De Waard (1996) a réalisé une étude où les mêmes sujets devaient effectuer la même tâche, en situation de conduite réelle et sur un simulateur. Selon les résultats obtenus via la RSME, conduire sur un simulateur demande plus d'efforts que la conduite réelle.

Comparativement aux autres mesures de la charge de travail, la RSME est une des mesures les plus sensibles (Verwey et Veltman, 1995). Lorsque la demande générée par la tâche augmente, l'effort investi par le conducteur augmente également afin d'essayer de maintenir constant le niveau de performance à cette tâche. La RSME est une mesure fiable dans la mesure où elle fait apparaître de façon constante un lien entre l'effort investi et la charge de la tâche.

L' « Overall Workload »(OW)

L'OW est une mesure unidimensionnelle comprenant une échelle bipolaire, mesurant la charge de travail globale. L'opérateur doit donner une note comprise entre 0 (très faible) et 100 (très forte), sur une échelle graduée de 5 en 5. Cette technique est facile à utiliser, mais est moins valide et fiable que le NASA-TLX. Elle est bien acceptée par l'opérateur et sa passation est simple. Cependant, sa diagnosticité est faible car on ne peut pas savoir sur quoi l'opérateur se base pour évaluer sa charge de travail.

2.3.3.2.2 Questionnaires et entretiens

Les questionnaires et les entretiens sont souvent réalisés après le vol ou la conduite. Ils peuvent comporter des questions ouvertes ou fermées, être structurés ou non. La combinaison de ces deux types de mesure donne souvent une bonne estimation de la charge

de travail, de même que leur utilisation croisée à des mesures physiologiques. Williges et Wierwille (1979) suggèrent d'utiliser les questionnaires et les entretiens uniquement comme complément d'autres mesures lors de la mesure de la charge de travail.

2.3.3.2.2.3 Les verbalisations

« Les verbalisations se distinguent des entretiens, dans la mesure où elles ne sont pas recueillies pour elles-mêmes par l'ergonome, mais pour compléter le recueil et le traitement d'autres observables »(Rabardel, 1998). Elles peuvent être spontanées ou provoquées par l'observateur, pendant ou consécutivement à l'activité de conduite ou de pilotage. Cependant, si elles sont simultanées à l'activité, elles peuvent la modifier ou en donner une représentation fautive, si la représentation est difficile à verbaliser ou construite par inférence (Bisseret, Sebillote, Falzon, 1999). En outre, l'opérateur est alors placé dans une situation de double tâche, avec le risque de modifier le déroulement de son activité, voire de dégrader sa performance à sa tâche principale. Si les verbalisations sont postérieures à l'activité, l'opérateur risque de trop rationaliser ce qu'il a fait, de tenter de se justifier et de donner un sens différent à ses actions de celui qu'elles avaient durant l'activité. Par ailleurs, l'opérateur peut ne plus se souvenir de la situation à commenter. Le décalage temporel entre l'activité et son commentaire peut rendre difficile la contextualisation de cette activité. Une solution consiste à utiliser un support vidéo qui permet de replacer l'opérateur dans un contexte très proche de son activité réelle, ce qui en facilite l'explicitation. Les verbalisations obtenues peuvent ainsi être directement mises en parallèle avec les comportements observés. On parle alors d'auto-confrontation (Rabardel, 1998). Ces auto-confrontations peuvent être partielles ou totales. Il est également possible d'utiliser des auto-confrontations croisées qui consistent à demander à un opérateur de commenter l'activité d'un autre et vice et versa.

2.3.3.2.2.4 Conclusion

La sensibilité, la sélectivité, la « diagnosticité », la validité et l'intrusion dans la tâche primaire sont capitales lors de la mesure de la charge mentale du conducteur. Selon De Waard (1996), le RSME a été conçu pour mesurer l'effort de l'opérateur. La « diagnos-

ticité » est faible si le RSME est appliqué pour chaque dimension de la tâche , comme le proposent Zijlstra et Van Doorn (1985). La sélectivité est difficile à évaluer car l'autre facteur auquel l'échelle pourrait être sensible, la charge physique, est très réduite durant la conduite automobile. Dans les différentes études, la fiabilité est haute et la sensibilité à la charge mentale est élevée. L'intrusion dans la tâche primaire est faible tant que les mesures sont effectuées après la conduite. Les besoins sont faibles puisque pratiquement aucun équipement n'est nécessaire au recueil de données. Enfin, aucun problème n'a été relevé concernant l'acceptation par l'opérateur. Cependant, les échelles présentées ne peuvent être appliquées régulièrement durant la phase expérimentale. Leur évaluation est donc globale et elles ne permettent pas de mettre en évidence les variations rapides de charge au cours de l'activité. On ne peut en effet faire passer un NASA-TLX toutes les minutes. L'utilisation des échelles multi-dimensionnelles doit être entourée de certaines précautions car elles présentent l'inconvénient de souvent induire la réponse. Les verbalisations spontanées ou guidées peuvent permettre d'obtenir un avis plus contextualisé que celui recueilli par les échelles.

En résumé, les principaux avantages des mesures subjectives sont que leur coût est faible, qu'elles n'interfèrent pas avec la tâche primaire puisqu'elles sont réalisées après la tâche en question et que leur validité est relativement bonne : elles semblent mesurer ce qu'elles sont censées mesurer. Les inconvénients sont qu'elles sont subjectives et qu'elles ne sont pas indépendantes d'autres facteurs qui ne sont pas directement liés à la tâche (par exemple, l'ambiance de travail). En outre, les sujets peuvent juger la difficulté de la tâche en elle-même plutôt que l'effort qui doit être réalisé et il n'y a pas de mesure durant la tâche elle-même. Enfin, les gens ne sont pas aussi performants pour mesurer la charge motrice que la charge cognitive ou perceptive (Vidulich, 1988). Aussi, cette méthode n'est-elle pas recommandée pour mesurer la charge motrice.

2.3.3.2.3 Mesures de performances

Les mesures de performances les plus utilisées sont les temps de réponse et le nombre d'erreurs.

Le temps de réponse

Le temps de réponse (appelé aussi temps de réaction) est la durée écoulée entre la présentation d'un stimulus et le début de la réponse induite chez le sujet. C'est l'indicateur le plus fréquemment utilisé pour mesurer la performance à une tâche principale (le plus souvent en laboratoire) mais également celle à une tâche secondaire. La chronométrie mentale est certainement une des méthodes d'investigation des processus mentaux les plus anciennes (Posner, 1978 ; Temprado, 1994). Elle est basée sur un principe simple selon lequel les opérations cérébrales de traitement informationnel sont d'autant plus complexes que leur durée est longue. Il est une mesure très sensible du comportement des sujets placés dans des situations de discriminations, voire de détection. Il existe deux variétés de temps de réaction. Le temps de réaction simple consiste à presser et relâcher un bouton dès que le sujet a détecté un stimulus. Le temps de réaction de choix implique que le choix de réponse dépend de la stimulation présentée. Par exemple, presser le bouton de la main droite lorsque le stimulus S1 est présenté et celui de la main gauche lorsque c'est le stimulus S2. D'une manière générale, les temps de réaction de choix tendent à être plus longs que les temps de réaction simples. On parle également de temps de détection qui correspondent au délai entre le moment où une cible est présentée et le moment où elle est détectée par le sujet et de temps de reconnaissance qui correspondent au délai entre le moment où une cible est présentée et le moment où elle est reconnue par le sujet. (Gawron, 2000).

Les tâches les plus fréquentes sont la détection de cibles de nature sensorielle différente, en vision principale ou périphérique, avec ou non un critère de décision (pour revue, voir : Grenn, 1995 ; De Waard, 1996 ; Gawron, 2000).

Cet indicateur est sensible à de nombreux facteurs tels que l'humeur, la fatigue ou l'usage de médicaments (Gawron, 2000). Coury, Boulette et Smith (1989) l'ont appliqué pour différencier des affichages en termes de facilité d'interprétation. De nombreuses études menées dans le domaine de l'aviation ont utilisé le temps de réponse à des stimuli visuels (Billingsley, Kuchar et Jacobson, 1999 ; Park et Lee, 1992 ; Payne et Lang, 1991 ; Remington et Williams, 1986 ; Wierwille, Rahimi et Casali, 1985 ; Yeh et Silverstein,

1992), le plus souvent appliqué à l'évaluation d'interfaces et de symbologies.

Le nombre d'erreurs

Le nombre d'erreurs est également un indicateur fréquent de la performance à une tâche, qu'elle soit principale ou secondaire. Dans une tâche de détection de cible (voir plus loin), les erreurs peuvent correspondre soit à une non-détection (le stimulus était présent, mais n'a pas été détecté), soit à une fausse détection (le stimulus est détecté alors qu'il était absent).

2.3.3.2.3.1 Mesures de performances à la tâche principale

Lorsque la charge est prévisible ou peut être anticipée, le conducteur essaiera généralement de contrôler la charge globale en rendant la tâche principale de conduite plus simple. Ainsi, Harms (1991) a montré que face à une charge plus élevée, suite à une complexification de l'environnement de conduite, les conducteurs tendent à réduire leur vitesse. Durant la conduite, une charge induite par des événements tels que des alarmes embarquées ou par une conversation avec un passager est ajoutée à la charge qu'induit la tâche principale. Si la charge induite par l'un des facteurs s'accroît, les conducteurs peuvent le compenser en diminuant la charge induite par un autre facteur. Cette compensation par un changement de comportement est nommée également compensation du risque. L'idée de la compensation du risque est que toute personne a un niveau déterminé d'aversion au risque.

De ce fait, en mesurant la performance à la tâche principale - dans le cas présent, les paramètres des performances de conduite - nous pouvons identifier la charge. Lorsque les études sont conduites en laboratoire, la performance à la tâche principale est souvent mesurée par les temps de réponse ou le nombre d'erreurs effectuées. En dehors du laboratoire, cela dépend de la tâche. Ainsi, si la tâche principale est la conduite d'un véhicule, les mesures prises en compte peuvent être la vitesse, l'écart type de la position latérale ou l'écart type des mouvements de volants. Dans l'aviation, les mesures concernent plutôt le décollage, l'ascension (Wierwille, Rahimi et Casali, 1985), la vitesse et l'altitude (Berger, 1977; North, Stackhouse et Graffunder, 1979), la phase d'approche et l'atterrissage

(Lintern, Kaul et Collyer, 1984). Certains paramètres comme les phases d'accélération, l'erreur moyenne d'altitude, les écarts d'altitude ou de cap sont également utilisés (Andre, Heers et Cashion, 1995 ; Soliday et Schohan, 1965). En laboratoire, on a souvent recours aux tâches de suivi (« tracking tasks »).

Les tâches de suivi

De nombreuses tâches de suivi ont été utilisées par des expérimentateurs en laboratoire. La forme la plus commune de suivi consiste à demander au sujet d'utiliser une manette pour maintenir un triangle au centre de l'écran. Le triangle bouge le long d'une échelle horizontale jusqu'à ce qu'il touche la limite droite ou gauche, déclenchant ainsi la fin de l'épreuve. Martin-Emerson et Wickens (1997) ont utilisé des tâches de suivi afin d'évaluer des pilotes utilisant un affichage tête haute (Head Up Display) ou tête basse (Head Down Display). Ils ont montré que la condition « tête haute » donnait moins d'erreurs de suivi vertical et latéral que la condition « tête basse ».

Huddleston et Wilson (1971) ont utilisé une tâche de suivi comme tâche principale dans une expérience où des pilotes devaient contrôler l'altitude en simulateur. Les auteurs introduisaient une série de tâches secondaires pour évaluer si elles interféraient ou non avec la tâche principale. Harris, Hancock, Arthur et Caird (1995) ont utilisé également une tâche de suivi pour évaluer comment la performance, la charge et la fatigue variaient avec différents degrés d'automatisation. Cette tâche de suivi consistait à utiliser une souris d'ordinateur pour maintenir un cercle dans une boîte sur l'écran. Les participants ont déclaré que le « suivi manuel » était plus lourd que le « suivi automatique ».

Selon Parkes (1991), la tâche principale du conducteur est de garder le contrôle du véhicule dans des conditions de sécurité acceptables. L'une des sous-tâches importantes est le contrôle de la position latérale. Une mesure de la déviation du véhicule par rapport au centre de la voie est une bonne façon d'évaluer la performance de la tâche principale en conduite automobile (De Waard, 1996).

L'écart type de la position latérale

L'écart type de la position latérale, qui mesure la façon dont le conducteur évolue à l'intérieur de sa voie, est une mesure de performance sensible, utilisée à plusieurs reprises

dans la littérature (Green, Lin et Bagian, 1993 ; Hicks et Wierwille, 1979 ; O'Hanlon, 1984). De Waard (1996) a mis en évidence un accroissement de l'écart type de la position latérale sous l'effet de l'alcool ou d'une conduite prolongée, mais non pas suite à des tâches exigeantes en charge mentale telles que l'utilisation d'un téléphone embarqué. Green, Lin et Bagian (1993) ont par ailleurs relevé le fait que l'écart type était dépendant de la largeur de la voie, les conducteurs ayant tendance à laisser leur position latérale fluctuer d'autant plus que la voie est large.

L'écart type des mouvements de rotation du volant

L'écart type des mouvements de rotation du volant est lié à celui de la position latérale, mais il est plus révélateur du comportement routier. Cette mesure est plus précise pour des lignes droites, selon l'idée que si une tâche génère une charge accrue, le conducteur accordera moins d'attention à la maîtrise de sa trajectoire dans la voie.

Le « Time to line crossing »(TLC)

Cette mesure est spécifique de la conduite automobile. Elle mesure le temps nécessaire pour que le véhicule atteigne le centre de la route ou la limite de la voie si aucun mouvement correctif n'est appliqué au véhicule (Godthelp, Milgram et Blaauw, 1984). Le TLC est de ce fait une mesure continue qui reflète la durée des périodes durant lesquelles les conducteurs peuvent négliger les erreurs de trajectoire. En ce sens, elle est censée refléter la stratégie de conduite et en particulier la stratégie d'occlusion (durée pendant laquelle le conducteur ne regarde pas la route). L'augmentation de la charge mentale engendre par conséquent une diminution des TLC ; une tâche génératrice d'une charge plus élevée diminuera le temps passé à observer la route (De Waard, 1996 ; Green, 1995). Cependant, une diminution des écarts peut certes indiquer une surcharge, mais également une sous-charge associée à une situation simple qui ne nécessite pas un contrôle attentionnel précis. Cette mesure peut être ambiguë et son utilisation doit être contextualisée.

Mesure de la vitesse

Un exemple de mesure de la vitesse est la durée nécessaire pour accomplir un trajet donné. Jordan et Johnson (1993) ainsi que Fairclough, Ashby, Ross et Parkes (1991) ont montré que les conducteurs prennent généralement plus de temps à terminer un parcours

s'ils doivent utiliser la radio ou avoir une conversation. Il s'agit d'une mesure de base de plus en plus remplacée par une mesure continue de la vitesse, en km/h. Il est également important de compenser les variations de la vitesse dues à des phénomènes extérieurs tels qu'une augmentation de la densité du trafic.

L'occlusion visuelle

En mesurant la quantité d'information nécessaire aux conducteurs dans leur environnement visuel, on obtient une indication de la charge visuelle. Une mesure classique permettant d'évaluer l'information visuelle qui est nécessaire au conducteur est l'occlusion visuelle qui consiste à obscurcir le champ de vision du conducteur pendant un temps déterminé ou à la discrétion du conducteur. Ce dernier peut ouvrir à nouveau ce champ de vision en exécutant une action spécifique. En mesurant la fréquence d'occurrence de cette action, on mesure la quantité d'information que le conducteur cherche à obtenir de l'environnement visuel ; on mesure également le degré d'incertitude du conducteur sur le futur proche. La façon dont le conducteur suit les événements et le contexte extérieur ne dépend pas seulement du contexte de conduite mais aussi de l'évaluation par le conducteur des probabilités de changement de l'environnement. Tant que le conducteur suppose que peu de choses vont changer ou que le système va l'assister suffisamment, il n'éprouve pas le besoin de scanner visuellement son environnement. En ce sens, l'occlusion visuelle mesure également l'état de confort, dans la mesure où des ouvertures moins fréquentes du champ de vision obscurci indiquent que le conducteur ne se sent pas en état d'incertitude ou qu'il a confiance dans la capacité du système à l'avertir si un événement inattendu survient (De Vos, Godthelp, Theeuwes et Verwey, 1996 ; Hoedemaeker et Van Winsum, 2001).

Deux types d'occlusion visuelle peuvent être utilisées : l'occlusion de la vision fovéale et l'occlusion de la vision périphérique. La vision fovéale est utilisée pour fournir de l'information avec une fréquence spatiale élevée (détection, identification d'objets dans la zone fovéale). La vision périphérique (de 10-15 degrés à 90 degrés) concerne l'information spatiale à faible fréquence, la détection et l'analyse du mouvement et de l'orientation spatiale. Elle est utilisée également pour le contrôle latéral (Mourant et Rockwell, 1972 ;

Riemersma, 1987; Summala, Nieminen et Punto, 1996) ainsi que pour le contrôle longitudinal (Higgins, Wood et Tait, 1998; Osaka, 1988).

2.3.3.2.3.2 Mesures de performance à une tâche secondaire

Comme nous l'avons vu précédemment (voir Chapitre 1), ce type de mesures a une grande importance dans l'étude de la charge mentale, du fait notamment du modèle de performance développé par Meister (1976). Cet auteur suppose que l'évolution de la performance avec la charge suit un palier, pour une charge faible, avant de décroître progressivement jusqu'à un second palier, de performance faible cette fois, correspondant à la saturation.

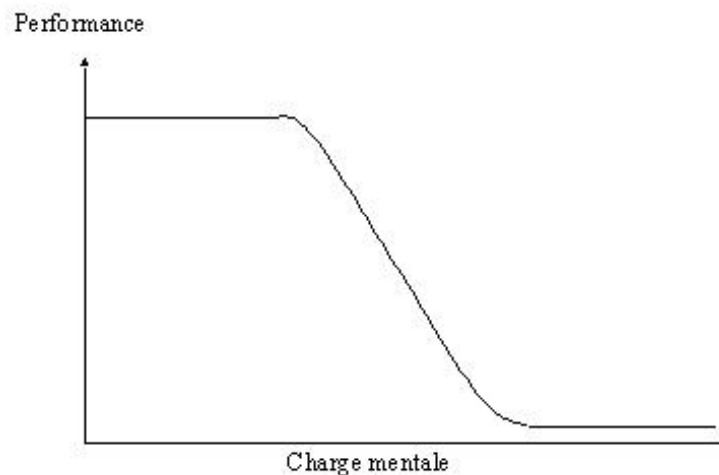


FIG. 2.3 – Dépendance Performance - Charge mentale

L'intérêt de ce modèle est de mettre en évidence que la corrélation entre charge et performance est plus ou moins visible suivant les niveaux de charge. Il peut être alors intéressant de superposer des tâches, afin d'augmenter artificiellement la charge globale pour atteindre la zone optimale de mesure.

La difficulté majeure est de choisir des tâches partageant les mêmes ressources et de limiter « l'intrusivité » des tâches additionnelles. Celles-ci sont plus ou moins éloignées de la tâche principale dans leur forme; ainsi, de nombreux auteurs (De Waard, 1996; O'Donnell et Eggemeier, 1986; Wickens, 1984) ont eu recours aux tâches de mémorisation, à la production ou à l'estimation d'intervalles temporels. Les tâches secondaires peuvent être visuelles (réponse à un stimulus visuel), sonores (écoute), mentales (raisonnement)

ou motrices (garder un pointeur entre deux lignes). Cependant, ces tâches secondaires peuvent être difficilement acceptées par l'opérateur voire compromettre sa sécurité. On privilégie donc plutôt les tâches secondaires « embarquées », qui s'insèrent dans le cadre de l'activité principale, tout en disposant d'une priorité moindre pour le sujet. On peut citer notamment, dans le cadre de la recherche automobile, l'étude des conversations entre le conducteur et les passagers (Wickens, 1984) ou le temps de réponse face à un stimulus dans une tâche non artificielle, la fréquence et la durée de fixation du tableau de bord ou des rétroviseurs (De Waard, 1996), le suivi de véhicules (Brookhuis, De Waard et Mulder, 1994). Le mécanisme de compensation d'une tâche lourde par l'ignorance d'autres tâches annexes est clairement visible dans la conduite : par exemple, lorsqu'un conducteur est impliqué dans une discussion, mais que le véhicule qui le précède freine soudainement, le conducteur arrête de parler momentanément. Ce mécanisme est précisément celui qui sous-tend classiquement les mesures de charge par la méthode d'une tâche secondaire. En donnant aux sujets une tâche supplémentaire, non relié directement à la tâche de conduite (par exemple compter des mots ou faire des soustractions) et en mesurant la performance de cette tâche, on obtient une indication de la charge. Si la charge induite par la tâche principale est faible, la performance sur la tâche secondaire sera meilleure. Si la performance sur la tâche secondaire chute, cela signifie qu'une charge plus importante est induite par l'autre tâche (conduire dans ce cas). Cependant, si la distinction entre tâches primaire et secondaire peut sembler claire en laboratoire, cela est en revanche plus ambigu sur le terrain.

Les tâches de détection sont classiquement utilisées comme tâches secondaires. Elles consistent à demander aux sujets d'indiquer verbalement (par exemple, dire « oui ») ou physiquement (par exemple, appuyer sur un bouton) chaque fois qu'ils détectent un stimulus. La mesure classiquement utilisée pour évaluer la performance à ces tâches est le temps de réponse qui correspond à la durée écoulée entre la présentation d'un stimulus et la réponse induite chez le sujet. Cette mesure est sensible à de nombreux facteurs tels que l'humeur, la fatigue ou l'usage de médicaments (Gawron, 2000). Elle est cependant utilisée couramment. Coury, Boulette et Smith (1989) l'ont ainsi appliquée pour différencier

des affichages en termes de facilité d'interprétation. De nombreuses études menées dans le domaine de l'aviation ont utilisé le temps de réponse à des stimuli visuels (Billingsley, Kuchar et Jacobson, 1999 ; Park et Lee, 1992 ; Payne et Lang, 1991 ; Remington et Williams, 1986 ; Wierwille, Rahimi et Casali, 1985 ; Yeh et Silverstein, 1992), le plus souvent pour évaluer des interfaces et des symboles. Les stimuli sonores peuvent aussi être utilisés pour évaluer des alertes sonores, les temps de réponse et la latence de saccade. Les alertes ont entraîné des temps de latence beaucoup plus élevés dans un contexte sonore que dans un contexte visuel. (Engelken et Stevens, 1989). Dans une étude suivante (Engelken, Stevens et Enderle, 1991), neuf cibles visuelles et auditives étaient utilisées pour quantifier la relation entre le temps de réponse manuel et la latence de saccade.

Dans la recherche automobile, Verwey et Veltman (1995) ont mis en évidence que la performance sur des tâches visuelles secondaires était sensible aux variations de la charge. Dans leur étude, des pics de charge étaient induits 10, 30 ou 60 secondes durant en ajoutant une tâche supplémentaire à la tâche primaire de conduite. Dans le cadre d'une tâche de détection visuelle, les sujets devaient répondre « oui » chaque fois qu'ils détectaient une cible sur un dispositif d'affichage monté sur le tableau de bord. L'intervalle entre les stimuli variait aléatoirement entre 2 et 4 secondes. L'étude a révélé que le pourcentage de cibles détectées décroît lorsqu'une tâche additionnelle induit une charge supplémentaire.

Notons qu'une distinction peut être faite entre le temps de détection qui correspond au délai entre le moment où un stimulus est présenté et le moment où est mesurée sa détection par le sujet et le temps de reconnaissance qui correspond au délai entre le moment où un stimulus est présenté et le moment où il est reconnu par le sujet (Gawron, 2000).

D'autres tâches secondaires peuvent être utilisées impliquant un raisonnement, une mémorisation, ou une soustraction. Les tâches arithmétiques, par exemple, consistent à présenter aux sujets des problèmes arithmétiques qu'ils doivent résoudre mentalement, sans l'aide d'un support écrit. Iavecchia, Iavecchia et Roscoe (1988) ont utilisé ce type de méthodes. Des chiffres étaient présentés aux sujets qui devaient en ajouter certains et presser des boutons différents suivant que la somme obtenue était paire ou impaire.

Comme nous l'avons vu précédemment, la communication peut également être uti-

lisée comme tâche secondaire. Elle peut être évaluée via la mesure de la fréquence, de l'intonation, de l'intensité (Brenner, Doherty et Shipp, 1994). Mais, si aucune instruction spécifique n'est fournie, il n'est pas clair pour le sujet de savoir quelle tâche est prioritaire. Par exemple, dans un trafic dense, la discussion avec le passager sera probablement interrompue par le conducteur afin de préserver la sécurité de la conduite, alors que dans un environnement à faible densité de trafic et si la conversation est intéressante, le conducteur privilégiera sans doute celle-ci, au détriment parfois de sa conduite. Elle peut aussi être utilisée comme moyen de distraction plutôt que comme mesure. Soliday et Schohan (1965) l'ont ainsi utilisée avec des pilotes qui devaient répéter des commandes données par l'examineur pour évaluer si ce facteur impactait leurs capacités de pilotage.

Les tâches secondaires peuvent aussi être liées à la tâche principale. Dans ce cas, la tâche secondaire n'est pas réellement ajoutée artificiellement, mais fait partie intégrante de la tâche de conduite. (De Waard, 1996). On peut par exemple demander au sujet de suivre un autre véhicule. Brookhuis, De Waard et Mulder (1994) ont mis au point une expérience basée sur ce principe, dans laquelle les sujets devaient suivre un véhicule expérimental. Afin de rendre la tâche suffisamment difficile, le véhicule de tête variait fréquemment sa vitesse. La tâche était définie de façon à être sensible aux diminutions de l'attention et de la perception. Elle se différenciait en cela de la tâche de maintien dans la voie, qui met plutôt en jeu la coordination œil-main.

Une autre tâche possible est la vérification des rétroviseurs. Cette tâche fait usuellement partie de la conduite, mais est moins fréquemment effectuée par le conducteur en situation de charge. Il est possible de distinguer deux variables : la fréquence des vérifications et leur durée. De Waard (1996) a ainsi utilisé la durée totale des vérifications de rétroviseur comme indicateur de la charge. Fairclough, Ashby et Parkes (1993) ont par ailleurs découvert que la fréquence et la durée de ces vérifications étaient représentatives de processus différents. La durée semble plus sensible à la difficulté de la prise d'information, alors que la fréquence reproduit les fluctuations de l'activité visuelle partagée entre la prise d'information à l'intérieur (compteur de vitesse) et à l'extérieur (rétroviseur) du véhicule. De même, la consultation d'une interface peut être considérée comme une tâche secondaire

puisqu'elle détourne l'attention du conducteur de la route. Elle est souvent évaluée par la fréquence du regard qui correspond au nombre moyen de regards portés par l'utilisateur à une interface (en anglais MNG : Mean Number of Glances). La MNG varie beaucoup suivant les tâches de conduite (Rockwell, 1988 ; Wierwille, Antin, Dingus et Hulse, 1988 ; Kurokawa et Wierwille, 1990 ; Taoka, 1990). Elle est liée à la complexité globale de l'affichage et mesure l'attention visuelle ou la charge visuelle (Verwey, Brookhuis et Janssen, 1996). Elle est également corrélée à la charge cognitive en général puisqu'elle fait intervenir un processus d'interprétation. Dans les expérimentations de Wierwille (1993a, 1993b), les conducteurs appliquent généralement la stratégie de visualiser l'affichage interne du véhicule durant moins d'une seconde et reviennent ensuite à leur situation initiale. Lorsque les charges mentale et cognitive augmentent (à cause d'une information complexe ou d'une lisibilité insuffisante, par exemple), l'utilisateur augmente le nombre de regards. L'accroissement de cette fréquence illustre dans ce contexte la tentative du conducteur pour éviter des impacts négatifs sur la sécurité. Il peut donc être identifié comme un indicateur de charge mentale ou visuelle accrue. Par ailleurs, la constance des résultats des différentes études sur le sujet permet de créditer cette mesure d'une forte fiabilité. Cependant, la fréquence n'est pas le seul facteur à étudier. Si le nombre de regards est limité, mais que la durée de chaque regard est longue, l'attention portée par le conducteur à la route s'en trouve amoindrie et on peut identifier un signe de mauvaise conception du système embarqué. La durée du regard est définie comme le délai entre le moment où le sujet cesse de fixer la route pour fixer une autre cible, telle que l'affichage interne et le moment où son regard rejoint à nouveau l'environnement extérieur (Rockwell, 1988). La mesure retenue est la moyenne de cette durée (AGD : Average Glance Duration) et elle est souvent interprétée comme un indicateur d'une conduite dangereuse. Bien que cette mesure soit utile pour évaluer la charge, elle est contrainte par des limitations dans certaines conditions d'expérimentation. De nombreuses études ont ainsi montré que l'AGD est relativement constant d'une tâche de conduite à une autre, avec une limite supérieure que le conducteur est réticent à dépasser. Ainsi, Wierwille, Antin, Dingus et Hulse (1988) ont mesuré des AGD variant entre 0,60 et 1,70 secondes pour différentes tâches de conduite. De ce

fait, la sensibilité de cette mesure aux variations de la charge est limitée car le spectre des valeurs possibles est restreint. Des différences faibles entre différents systèmes peuvent par conséquent passer inaperçues. De plus, cette mesure varie en fonction de la difficulté de l'environnement routier. Au final, la fiabilité de cette mesure paraît donc limitée et inférieure à l'étude de la fréquence. En raison de cette sensibilité relativement faible, elle est le plus souvent combinée à la fréquence (Fairclough, Ashby et Parkes, 1993).

Une autre approche potentiellement intéressante pour mesurer les variations de la charge se base sur le fait qu'une charge accrue résulte en une diminution du champ visuel utile. Cette approche combine les tâches de détection de stimuli visuels et l'analyse du regard. Au cours d'une expérience de conduite sur route, Miura (1986) présentait des points lumineux sur le pare-brise, sous différents angles en fonction de la position du conducteur et mesurait le temps de réponse pour détecter les stimuli. Il a mis en évidence le fait que ce temps de réponse croît dans des conditions de complexification de la tâche de conduite. Les résultats étaient interprétés comme indiquant une réduction du champ visuel avec la complexification de la tâche et l'augmentation subséquente de la charge. Des résultats similaires ont été rapportés par Williams (1985, 1995). Dans un grand nombre d'expérimentations, il est apparu qu'avec un accroissement de la charge visuelle fovéale, un « effet tunnel » était fréquent, générant un temps de réponse accru face à des stimuli périphériques. La capacité à traiter l'information périphérique décroît lorsque la charge fovéale croît. Ces résultats ont cependant soulevé la question de savoir si cet « effet tunnel » est effectivement visuel ou cognitif, comme le suggèrent Dirkin et Hancock (1985). De leur point de vue, le phénomène correspond à une sélectivité accrue de l'attention. On peut citer également ce type de vision « tunnel » sous l'effet de forte fatigue. Ces tâches secondaires fondées sur la vision périphérique, utilisées comme méthodes pour estimer la charge, sont très populaires depuis quelques années dans la recherche sur le comportement du conducteur. Une des méthodes consiste à présenter un stimulus visuel à un angle horizontal de 11 à 23 degrés avec un intervalle entre les stimuli de 3 à 5 secondes (van Winsum, Martens et Herland, 1999). De cette façon, le stimulus peut être perçu dans la région périphérique. Le conducteur doit répondre au stimulus en pressant sur un

bouton attaché à l'index. Van Winsum, Martens et Herland (1999) ont ainsi montré que le pourcentage de signaux manqués et le temps de réponse moyen augmentaient avec la charge. Cette méthode, aussi appelée tâche de détection périphérique (PDT : Peripheral Detection Task) est utile pour mesurer la charge sur une longue période et pour mesurer les variations et les pics de charge de courte durée. Dans de nombreuses études, cette méthode a montré une sensibilité aux faibles variations de charge, induites par le trafic, l'environnement routier, l'expérience de conduite ou la complexité de l'IHM (voir par exemple Van Winsum et Hoedemaeker, 2000 ; Van Winsum, Martens et Herland, 1999). La PDT est utile dans l'étude de la perception des cibles ou objets importants pour la conduite : piétons, panneaux de signalisation, etc. L'angle horizontal auquel sont présentés ces stimuli correspond, en effet, à la position usuelle de ces éléments dans l'environnement routier. Si des stimuli PDT sont manqués par le conducteur à cause de la charge, on peut en déduire que dans des circonstances similaires le conducteur n'aurait probablement pas remarqué les panneaux de signalisation, les piétons ou tout autre objet dont la perception est susceptible d'être important pour la conduite.

Enfin, certaines tâches secondaires présentent cependant des inconvénients qui réduisent leur utilisabilité. L'inconvénient majeur est leur interférence avec la tâche primaire. Dans la mesure où le principe des tâches secondaires consiste à entrer en compétition avec l'exécution de la tâche primaire, les effets d'interférence sont alors difficiles à interpréter. La tâche secondaire peut également affecter la stratégie d'allocation des ressources du conducteur, celui-ci pouvant choisir d'allouer plus d'attention à la tâche secondaire qu'à la tâche principale. En outre, le niveau de charge induite par la tâche secondaire doit être modulé de façon précise, ce qui est difficile en pratique. La méthode PDT (Van Winsum, Martens et Herland, 1999) a sur ce plan montré sa non-intrusivité et la priorisation correcte effectuée dans l'allocation des ressources entre tâches primaire et secondaire.

2.3.3.3 Conclusion concernant les mesures utilisées dans la littérature

De nombreuses mesures ont été utilisées dans le domaine de l'aviation et de l'automobile pour mesurer la charge mentale et la performance. Ces deux domaines ont de

nombreux points communs, notamment concernant les activités cognitives, attentionnelles et sensorielles des opérateurs, mais diffèrent également, notamment pour ce qui concerne les proxes d'informations partagées entre l'extérieur et l'intérieur de l'habitacle. Il s'en suit que certains indicateurs peuvent être pertinents dans un domaine et ne pas l'être dans l'autre.

La majorité des études combine différents types de mesures car beaucoup d'entre elles sont influencées par des facteurs externes comme la fatigue, le stress, qui peuvent avoir un effet sur la charge mentale (Casali et Wierwille, 1983 ; Gopher et Braune, 1984 ; Hankins et Wilson, 1998 ; Sammer, 1998 ; Soliday et Schohan, 1965 ; Veltman et Gaillard, 1998 ; Wierwille, Rahimi et Casali, 1985 ; Williges et Wierwille, 1979 ; Wilson, Fullenkamp et Davis, 1994). Hart et Hauser (1987) ont recherché une méthodologie d'évaluation de la charge mentale durant le vol en utilisant des questionnaires, la fréquence cardiaque et l'analyse des communications. Les questionnaires consistaient en différentes échelles mesurant la charge globale, le stress, l'effort mental, la fatigue, la pression temporelle et la performance pour chaque phase du vol. Les réponses étaient données dès que possible après chacune des phases. Durant les phases de décollage et d'atterrissage, les communications étaient nombreuses, la charge globale évaluée était élevée ainsi que la fréquence cardiaque. Le nombre de communications était également corrélé aux résultats issus des échelles évaluant la charge globale, le stress et l'effort. Les auteurs concluent que des facteurs similaires semblent affecter à la fois les mesures subjectives, les mesures objectives et les mesures physiologiques.

Malgré certaines contraintes, les mesures physiologiques sont souvent les seules à pouvoir mesurer un délai de perception, les charges attentionnelle et émotionnelle associées à un événement précis. Il faut cependant noter qu'elles peuvent être parfois intrusives et qu'il faut s'assurer que les électrodes placées sur le corps ne perturbent pas la tâche à réaliser et n'affectent pas non plus la performance. Bien entendu, si l'utilisation de ces mesures présente le moindre risque pour le pilote ou le conducteur, il est nécessaire d'utiliser un simulateur, afin de garantir la sécurité des sujets. Évidemment, ces mesures nécessitent la présence d'une personne experte qui doit les préparer et interpréter les données. Enfin,

de nombreuses mesures physiologiques n'ont pas été complètement validées et ne sont pas aussi fiables que d'autres mesures. La tension musculaire ou la fréquence de fusion ont ainsi donné des résultats contradictoires et doivent être utilisés avec précaution.

Les échelles subjectives ont été évaluées comme réellement fiables et valides. Elles ont été fréquemment utilisées et les résultats obtenus ont une forte corrélation avec la charge mentale. Cependant, il est délicat de les utiliser dans des situations d'urgence car le recueil des réponses aura lieu a posteriori.

Concernant les mesures de performance, le temps de réponse est l'indicateur le plus fréquemment utilisé. Aussi bien dans l'aviation que dans le domaine automobile, la dimension temporelle et en particulier la capacité à réagir rapidement, est essentielle. Mais lorsque des mesures de temps de réponse sont utilisées durant des expérimentations sur route ouverte, il faut s'assurer qu'elles n'interfèrent pas avec la tâche principale de conduite et que la sécurité des usagers n'est pas compromise.

Enfin, afin d'obtenir l'évaluation la plus précise possible de la charge mentale, il est nécessaire d'utiliser simultanément des mesures physiologiques, subjectives et de performance. Cela permet de réduire les effets des facteurs externes, « parasites », qui influencent la mesure de la charge mentale. Cependant, il n'existe pas de combinaison d'indicateurs qui serait applicable à toutes les recherches cherchant à évaluer la charge mentale d'un individu. Il faut, bien entendu, adapter ces indicateurs à la problématique spécifique de chacune des recherches. Même si la plupart des indicateurs ont leurs avantages et inconvénients spécifiques, ils mesurent tous un certain aspect de la charge. En combinant les trois types de mesures, certains inconvénients associés à une mesure sont compensés par un des deux autres types de mesure.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, des indicateurs, a priori pertinents pour notre problématique, seront évalués. Ils seront bien entendu issus des trois types de mesure. Concernant les mesures physiologiques, malgré certains inconvénients dont nous avons conscience, la réponse électrodermale est un indicateur qui semble adapté à notre problématique puisqu'elle permet d'évaluer la charge émotionnelle et attentionnelle associée à une situation ou une interface précise. Le temps de réponse sera utilisé pour l'évaluation

des systèmes d'aide associés à des situations d'urgence. Nous retiendrons également l'analyse du regard pour estimer le temps de détournement du regard du conducteur de la route lors de la présentation d'une interface visuelle. Enfin, au vue de notre problématique, les questionnaires ou les entretiens semblent être des mesures subjectives appropriées. Nous avons donc évalué dans un premier temps ces différentes mesures, sur piste et simulateur de conduite, afin de les utiliser lors d'évaluation de systèmes d'aide à la conduite en situation de conduite sur route ouverte.

Chapitre 3

Mise au point d'une méthodologie d'évaluation des systèmes d'aide à la conduite

L'élaboration des systèmes d'aide à la conduite pose certains problèmes aux concepteurs qui doivent mettre au point des interfaces adaptées aux contraintes et aux contextes variés de la conduite automobile. La nécessité d'évaluer l'interaction conducteur / système a mis en évidence la difficulté de trouver une méthodologie d'évaluation fiable répondant à cette problématique. De nombreux moyens d'expérimentation et différents indicateurs sont disponibles dans la littérature, chacun possédant ses limites et ses avantages et de ce fait son domaine d'application privilégié. L'objectif de cette thèse étant d'évaluer différentes interfaces innovantes applicables aux systèmes d'aide associés à une situation de conduite critique, une méthodologie d'évaluation adaptée à ce contexte a dû être préalablement mise au point.

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les systèmes d'aide à la conduite associés à une situation critique doivent avoir des interfaces particulièrement adaptées aux contraintes temporelles et contextuelles de la situation. Ces systèmes sont associés à des situations de conduite relativement rares. Le conducteur n'aura donc pas l'habitude des interfaces présentées et devra y réagir de façon adaptée et rapide. Ainsi, les interfaces

devront être parfaitement explicites, peu stressantes, mais suffisamment intrusives pour être perçues rapidement. Tout le paradoxe réside dans le fait qu'il faut prévenir le conducteur d'un danger, en détournant le moins possible son attention de la route, où se situe justement le danger à éviter.

Deux types d'interfaces innovantes semblent être compatibles avec ce contexte de conduite. Les interfaces haptiques, d'une part, permettent a priori de ne pas solliciter le canal visuel, ce qui peut en partie résoudre le problème. Cependant, il faut s'assurer qu'elles ne génèrent pas de réponses inadaptées associées à une forte émotion ou un traitement cognitif trop long. Les réponses émotionnelles et attentionnelles induites devront donc être compatibles avec le contexte d'utilisation de ces systèmes. D'autre part, si une interface visuelle s'avère nécessaire, notamment pour expliciter l'interface haptique, une présentation de cette information dans l'axe de la route peut limiter le temps de détournement du regard et être adaptée à ces systèmes. Théoriquement, ces nouvelles interfaces répondent aux contraintes liées aux systèmes d'aide associés aux situations de conduite critiques, mais il faut les évaluer de façon suffisamment précise.

De nombreuses mesures ont été passées en revue (chapitre 2) afin de retenir ici celles qui correspondent le mieux à notre évaluation. Ainsi, la réponse électrodermale, le temps de réponse et les questionnaires ont été retenus. Nous avons dans un premier temps évalué ces mesures via deux études préliminaires associées à deux contextes expérimentaux différents (piste et simulateur). L'objectif était de définir une méthodologie d'évaluation adaptée. Cette définition fera l'objet du présent chapitre.

Le chapitre 4 sera ensuite consacré à l'application de cette méthodologie pour la mise au point de deux systèmes d'aide à la conduite comprenant des interfaces haptiques (Time Warning et Curve Warning) ainsi qu'à l'évaluation de deux solutions de présentation d'informations visuelles dans l'axe de la route.

3.1 Première étude préliminaire : Évaluation d'indicateurs pertinents et de la piste comme moyens d'évaluation de systèmes d'aide

3.1.1 Principes et méthodes de l'étude

Le but de cette première étude préliminaire était d'obtenir des indicateurs fiables du coût cognitif et perceptif associé à une interface Homme / Véhicule. Nous voulions évaluer le coût du traitement associé à une présentation d'informations au conducteur. Pour cela, nous avons fait varier la présentation des informations au conducteur de manière à faire varier les coûts perceptif et cognitif associés au traitement de ces informations. Le but était d'identifier les indicateurs qui allaient effectivement refléter les variations du coût du traitement, associé à des présentations différentes des informations. Soulignons que notre objectif est ici la recherche d'indicateurs pertinents en vue d'utilisations expérimentales ultérieures en contexte industriel et non directement l'évaluation des dispositifs techniques eux-mêmes.

3.1.1.1 Hypothèses

Nos hypothèses étaient les suivantes :

- Les différentes situations expérimentales, induites par la présentation de signaux à caractère plus ou moins urgent, devraient induire une charge attentionnelle différente chez les conducteurs.
- Le voyant associé à une situation urgente (obstacle sur la voie) induirait chez le conducteur des réponses différentes (temps de réponse plus courts, stress, réactions émotionnelles, etc.) de celles provoquées par le voyant associé à une situation peu urgente (information sur l'état des feux anti-brouillard)
- La modalité auditive associée à la modalité visuelle (l'allumage de voyants) induirait une réponse différente de celle liée à la modalité visuelle seule. (Cette question anticipe sur celle, à traiter ultérieurement, du choix technique des modes les plus

pertinents de présentation d'information).

- Les différents paramètres choisis devraient permettre de distinguer les différentes situations expérimentales et de percevoir les différences de coût perceptif et cognitif qu'induisent les situations choisies.

3.1.1.2 Population d'étude

10 conducteurs, tous volontaires, ont été recrutés parmi le personnel Renault (pour des raisons de confidentialité). Ils possèdent tous leur permis de conduire et ont une expérience plus ou moins importante de la conduite, mais aucun n'est pilote professionnel.

3.1.1.3 Choix des paramètres à mesurer

3.1.1.3.1 Paramètres enregistrés concernant le conducteur

Concernant les mesures de performances, nous avons choisi d'utiliser comme indicateur le temps de réponse des conducteurs. Il nous permet d'avoir une mesure objective de la performance des conducteurs et, plus particulièrement, de la performance des conducteurs interagissant avec le système lors de la présentation d'alertes visuelles ou sonores. Ces temps de réponse sont censés refléter les différents niveaux de charge attentionnelle des conducteurs et différer selon les situations expérimentales. Ces temps de réponse correspondent au temps entre la présentation d'un stimulus et la réponse du conducteur qui peut être :

- soit le contact « pédale de frein », afin de savoir quand le sujet commence à freiner suite à l'allumage des voyants rouges,
- soit le contact « appel de phare » afin d'enregistrer la réponse du sujet aux voyants oranges.

Ces deux paramètres pouvaient être confirmés par l'analyse des vidéos fournies par les caméras embarquées, filmant les pieds et le buste du conducteur.

Parmi les différents indicateurs physiologiques, nous avons sélectionné la Résistance Électrique Cutanée et le Potentiel Électrique Cutané que l'on a enregistrés pendant tout l'essai, au moyen d'électrodes placées sur la main gauche du conducteur. Ces deux pa-

ramètres physiologiques ont été choisis pour deux raisons : leur caractère informatif sur les charges attentionnelles et émotionnelles occasionnées par la conduite et leur mode de recueil non invasif et peu gênant pour la conduite (Priez, Petit et Brigout, 2001).

Rappelons que la résistance cutanée est appréciée en faisant passer un courant constant de $15\mu A$ entre deux électrodes Ag/AgCl impolarisables de $25mm^2$ de surface. Elles sont positionnées sur la 3ème phalange de l'index et du médus de la main gauche. Le potentiel cutané est recueilli par deux électrodes de $78mm^2$ de surface active. L'électrode active est positionnée sur l'intérieur du poignet, l'électrode de référence, 10 cm plus bas. Ces signaux sont informatifs par leurs réponses phasiques consécutives à un stimulus ponctuel. Elles sont analysées et quantifiées selon deux index élaborés dans les années 90, par une équipe du CNRS (Vernet-Maury, 1991) :

- le code SYDER pour le potentiel qui différencie les réponses selon leur forme et leur durée (A = réponse courte, B et C = réponses longues). Les réponses courtes sont révélatrices d'une faible charge émotionnelle ; à l'inverse, les réponses longues sont le reflet d'une forte charge émotionnelle.
- la Durée de la Perturbation Ohmique pour la Résistance (DPO) qui caractérise la période pendant laquelle le sujet est soumis à un stimulus. Par exemple, une longue DPO est le reflet d'un long traitement cognitif et d'une importante charge attentionnelle. La DPO permet donc de savoir à quel moment le sujet a perçu le stimulus.

En outre, on obtient également le délai entre le stimulus et sa perception par le sujet, perception qui correspond au début de la réponse physiologique (Priez, Petit et Brigout, 2001).

Le traitement et l'analyse de la réponse électrodermale, qui nécessite une expertise en physiologie, ont été réalisés en collaboration avec un expert en physiologie (C. Petit).

3.1.1.4 Procédure et consigne

3.1.1.4.1 Protocole expérimental

L'expérimentation s'est déroulée sur piste et a consisté à placer le conducteur au

volant d'un véhicule (Renault Clio II) équipé d'instruments de mesure et à enregistrer simultanément différentes variables dépendantes. Le parcours était de l'ordre de 10 à 15 minutes et comportait quatre tours de piste. Le premier tour de piste était un tour d'habituatation (les données obtenues lors de ce premier tour n'ont donc pas été prises en compte lors de l'analyse des résultats).

Des obstacles étaient placés à différents endroits de la piste sur la voie de droite et le conducteur devait les éviter. Il était prévenu de la présence de ces obstacles 75 mètres avant par l'allumage d'un voyant rouge sur le tableau de bord. Le voyant s'allumait grâce à la détection d'une balise placée en amont de l'obstacle. Cela nous permettait de simuler la présence d'un système anti-collision : notre véhicule n'était pas équipé d'un radar permettant la détection d'obstacles, mais nous avons installé des balises à 75 mètres des obstacles installés sur le parcours. Une cellule photo-électrique placée sur l'aile droite du véhicule détectait la balise et transmettait à notre ordinateur embarqué un signal permettant d'allumer le voyant rouge. En outre, le conducteur devait éteindre le voyant de feux anti-brouillard qui s'allumait à divers moments durant ces tours de piste. Ces deux voyants pouvaient s'allumer selon des modalités variables.

Les sujets étaient prévenus que l'étude portait sur l'évaluation de différents modes de présentation d'information et que leur comportement ainsi que celui de la voiture seraient enregistrés durant un parcours de conduite sur circuit au Centre Technique d'Aubevoive (pistes d'essai de Renault). Un expérimentateur leur donnait ensuite la consigne suivante présentée dans le tableau.

Après nous être assurés que les sujets avaient bien compris la consigne, nous les installions dans le véhicule expérimental. L'expérimentateur leur plaçait ensuite les électrodes pour le recueil des données physiologiques. Le sujet pouvait alors commencer à rouler, en compagnie d'un copilote susceptible d'intervenir si nécessaire par sécurité.

Lorsque le véhicule arrivait à 75 mètres de l'obstacle, une balise déclenchait l'allumage du voyant rouge. Il y avait deux obstacles et trois signaux oranges par tour de piste, soit 8 obstacles, situés à différents endroits du circuit et signalés par un voyant rouge et 12 voyants oranges. Nous rappelons que le premier tour de piste était un tour d'habituatation.

« Vous allez maintenant conduire normalement sur le circuit. Vous ne devez prendre aucun risque et ne pas chercher à conduire particulièrement vite.

Il est important que vous conduisiez comme vous en avez l'habitude.

Par moment, des voyants s'allumeront sur votre tableau de bord :

- Si c'est un voyant d'alerte **orange** qui s'allume, cela signifie que vos feux anti-brouillard sont allumés, vous devrez alors faire un **appel de phare** afin de les éteindre, mais **uniquement dans la mesure où cela ne perturbe pas votre conduite.**
- Si c'est un **voyant** d'alerte **rouge** qui s'allume, cela signifie qu'un **obstacle** se trouve sur votre voie, il vous faudra alors freiner afin de l'éviter.

Remarque : Le même voyant peut s'allumer de différentes façons (en clignotant, avec un bip sonore associé, etc.), mais il signifiera toujours la même chose. »

Seuls les 6 derniers voyants rouges et les 9 derniers voyants orange ont été pris en compte lors de l'analyse des résultats. Les modalités d'allumage des voyants étaient les suivantes :

- Pour le voyant orange, on a 3 modalités d'affichage présentées dans un ordre aléatoire :

Modalité	Type Affichage	Clignote	Bip associé
1	Orange	Non	Non
2	Orange	Non	Oui
3	Orange	Oui	Non

- Pour le voyant rouge, on a 3 modalités d'affichage présentées dans un ordre aléatoire :

Modalité	Type Affichage	Clignote	Bip associé
1	Rouge	non	Non
2	Rouge	non	Oui
3	Rouge	oui	Non

3.1.1.5 Plan expérimental

3.1.1.5.1 Variables indépendantes

Modalité d'allumage du voyant :

- couleur (rouge versus orange)
- fixe ou clignotant
- bip sonore associé : non versus oui

3.1.1.5.2 Variables dépendantes

- Mesures concernant le véhicule
 - la vitesse du véhicule
 - l’angle au volant
 - l’accélération longitudinale
 - l’accélération transversale

- Mesures concernant le conducteur :
 - les temps de réponse aux signaux,
 - la durée de la DPO,
 - la durée du potentiel
 - les temps d’apparition de la DPO et du potentiel,
 - le temps entre l’apparition de la réponse physiologique et la réponse comportementale du conducteur.

3.1.2 Analyse des résultats

Nos données sont analysées dans le but d’apprécier leur intérêt dans une étude sur l’attention partagée des conducteurs et les choix ergonomiques d’interfaces à bord des véhicules ; notre intention était d’établir des protocoles de mesures valides.

Les sujets effectuaient quatre tours de piste, mais seuls les trois derniers tours étaient pris en compte lors de l’analyse des données, le premier tour étant considéré comme un tour d’habitation. Nous avons donc comme stimuli six voyants rouges (urgents) associés à des obstacles présents sur la voie de droite et neuf voyants oranges (peu urgents). Les obstacles étaient positionnée de façon à être masqués jusqu’au dernier moment. Nous avons pour cela utilisé les courbes de la piste. Les conducteurs adaptaient leur vitesse à ses courbes et celle-ci était par conséquent inférieure à 50 km/h. Cela nous permettait également de limiter la vitesse d’impact au cas où un choc aurait eu lieu. Des données de tous les sujets, après agrégation et analyse statistique (ANOVA et le test Protected Least Significant Difference (P.L.S.D.) de Fisher), on extrait les résultats suivants :

3.1.2.1 Effet de la couleur (associé au degré d'urgence)

3.1.2.1.1 Les temps de réponse

Il n'y a aucun effet significatif de la couleur sur le temps de réponse ($F=0,162$ et $p=0,688$). Le temps de réponse au voyant orange ($M = 4,39$ secondes) est sensiblement le même que le temps de réponse au voyant rouge ($M = 3,92$ secondes).

3.1.2.1.2 La durée de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif de la couleur sur la durée de la DPO ($F=2,384$ et $p=0,128$). La durée de la DPO associée au voyant orange ($M = 3,16$ secondes) est sensiblement la même que celle associée au voyant rouge ($M = 3,96$ secondes).

3.1.2.1.3 Les délais d'apparition de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif de la couleur sur le délai d'apparition de la DPO ($F=0,551$ et $p=0,461$). Le délai d'apparition de la DPO associé au voyant orange ($M = 2,6$ secondes) est sensiblement plus long que celui associé au voyant rouge ($M = 1,56$ secondes).

3.1.2.1.4 Les délais entre l'apparition de la DPO et la réponse comportementale du sujet (= Délai Action - DPO)

Il n'y a aucun effet significatif de la couleur sur le délai Action - DPO ($F=0,086$ et $p=0,770$). Le délai Action - DPO associé au voyant orange ($M = 2,44$ secondes) est sensiblement le même que celui associé au voyant rouge ($M = 2,16$ secondes).

3.1.2.1.5 Les délais d'apparition des potentiels

Il n'y a aucun effet significatif de la couleur sur le délai d'apparition du potentiel ($F=0,138$ et $p=0,712$). Le délai d'apparition du potentiel associé au voyant orange ($M = 1,47$ secondes) est sensiblement le même que celui associé au voyant rouge ($M = 1,25$ secondes).

3.1.2.2 Effet du bip sonore

3.1.2.2.1 Les temps de réponse

Le temps de réponse est beaucoup plus court lorsqu'un bip sonore est associé au voyant ($M = 2,58$ s) que lorsqu'il n'y en a pas ($M = 5,56$ s) et cet effet est significatif ($F=7,067$ et $p=0,009$).

3.1.2.2.2 La durée de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif du bip sonore sur la durée de la DPO ($F=0,401$ et $p=0,529$). La durée de la DPO associée au voyant sans bip sonore ($M = 3,67$ s) est sensiblement la même que celle associée au voyant avec un bip sonore ($M = 3,33$ s).

3.1.2.2.3 Les délais d'apparition de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif du bip sonore sur le délai d'apparition de la DPO ($F=2,724$ et $p=0,105$). Cependant, le délai d'apparition de la DPO associé au voyant sans bip sonore ($M = 3,2$ s) est beaucoup plus long que celui associé au voyant avec un bip sonore ($M = 0,96$ s).

3.1.2.2.4 Les délais entre l'apparition de la DPO et la réponse comportementale du sujet (= Délai Action - DPO)

Il n'y a aucun effet significatif du bip sonore sur le délai Action - DPO ($F=0,91$ et $p=0,764$). Le délai Action - DPO associé au voyant sans bip sonore ($M = 2,46$ s) est sensiblement le même que celui associé au voyant avec un bip sonore ($M = 2,17$ s).

3.1.2.2.5 Les délais d'apparition des potentiels

Il n'y a aucun effet significatif du bip sonore sur le délai d'apparition du potentiel ($F=2,352$ et $p=0,132$). Cependant, le délai d'apparition du potentiel associé au voyant sans bip sonore ($M = 1,82$ s) est plus long que celui associé au voyant avec un bip sonore ($M = 0,97$ s).

3.1.2.3 Effet du clignotement

3.1.2.3.1 Les temps de réponse Il n'y a aucun effet significatif du clignotement sur le temps de réponse ($F=0,558$ et $p=0,457$). Cependant, le temps de réponse à un voyant fixe ($M = 3,99$ s) est sensiblement plus court que le temps de réponse à un voyant clignotant ($M = 5,09$ s). L'absence de significativité peut être due au faible nombre de stimuli clignotants traités.

3.1.2.3.2 La durée de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif du clignotement sur la durée de la DPO ($F=2,081$ et $p=0,155$). La durée de la DPO associée à un voyant fixe ($M = 3,33$ s) est sensiblement la même que celle associée à un voyant clignotant ($M = 4,27$ s). Ceci peut être dû au faible nombre de stimuli clignotants traités.

3.1.2.3.3 Les délais d'apparition de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif du clignotement sur le délai d'apparition de la DPO ($F=0,004$ et $p=0,947$). Cependant le délai d'apparition de la DPO associé à un voyant fixe ($M = 3,33$ s) est sensiblement plus court que celui associé à un voyant clignotant ($M = 4,27$ s).

3.1.2.3.4 Les délais entre l'apparition de la DPO et la réponse comportementale du sujet (= Délai Action - DPO)

Le délai Action - DPO est beaucoup plus court lorsque le voyant est fixe ($M = 1,78$ s) que lorsqu'il clignote ($M = 4,59$ s) et cet effet est significatif ($F=6,099$ et $p = 0,017$).

3.1.2.3.5 Les délais d'apparition des potentiels

Il n'y a aucun effet significatif du clignotement sur le délai d'apparition du potentiel ($F=1,687$ et $p=0,200$). Nous pouvons cependant noter que le délai d'apparition du potentiel lorsque le voyant est fixe ($M = 1,20$ s) est plus court que celui associé à un voyant clignotant ($M = 2,06$ s).

Ce défaut de significativité est certainement dû au faible nombre de données concernant les voyants clignotants.

3.1.2.4 Interaction entre la couleur et le bip sonore

3.1.2.4.1 Les temps de réponse

L'effet de l'interaction entre la couleur et le bip sonore sur le temps de réponse est significatif ($F= 5,548$ et $p = 0,020$), mais il est essentiellement dû à une diminution du temps de réponse au voyant orange lorsqu'un bip sonore est associé ($M = 1,55$ s) comparativement au temps de réponse lorsque le voyant orange est présenté sans bip sonore ($M = 6,75$ s). En revanche, pour le voyant rouge, la présence du bip sonore ($M = 3,94$ s) ne modifie pas significativement le temps de réponse comparativement à celui mis au voyant présenté sans bip sonore ($M = 3,90$ s)

3.1.2.4.2 La durée de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le bip sonore sur la durée de la DPO ($F=0,191$ et $p=0,664$).

3.1.2.4.3 Les délais d'apparition de la DPO

Il n'y a aucune interaction significative entre la couleur et le bip sonore pour le délai d'apparition de la DPO ($F=1,832$ et $p=0,1816$). Cependant, le délai d'apparition de la DPO lorsque le voyant est orange avec un bip sonore associé est beaucoup plus court ($M= 0,55$ s) que pour le voyant orange sans bip sonore ($M = 4,39$ s), pour le voyant rouge sans bip ($M = 1,64$ s) ou le voyant rouge avec un bip sonore associé ($M = 1,48$ s).

3.1.2.4.4 Les délais entre l'apparition de la DPO et la réponse comportementale du sujet (= Délai Action - DPO)

Il n'y a aucune interaction significative entre la couleur et le bip sonore pour le délai Action - DPO ($F=2,908$ et $p=0,094$). Cependant, le délai Action - DPO lorsque le voyant est orange avec un bip sonore associé est beaucoup plus court ($M= 1,54$ s) que pour le voyant orange sans bip sonore ($M = 3,24$ s) et inversement pour le voyant rouge : sans

bip (M 1,43 s), avec un bip sonore associé (M = 2,96 s).

3.1.2.4.5 Les délais d'apparition des potentiels

Il n'y a aucune interaction significative entre la couleur et le bip sonore pour le délai d'apparition du potentiel ($F=2,833$ et $p=0,0995$). Cependant, le délai d'apparition du potentiel lorsque le voyant est orange avec un bip sonore associé est beaucoup plus court (M= 0,64 s) que pour le voyant orange sans bip sonore (M = 2,16 s), en revanche, le délai d'apparition du potentiel associé au voyant rouge sans bip (M = 0,99 s) est sensiblement le même que celui associé voyant rouge avec un bip sonore (M = 1,43 s)

3.1.2.5 Interaction entre la couleur et le clignotement

3.1.2.5.1 Les temps de réponse

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le clignotement sur le temps de réponse ($F=0,006$ et $p=0,937$). Ceci est dû au faible nombre de stimuli clignotants traités.

3.1.2.5.2 La durée de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le clignotement sur la durée de la DPO ($F=0,002$ et $p=0,968$).

3.1.2.5.3 Les délais d'apparition de la DPO

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le clignotement sur le délai d'apparition de la DPO ($F=0,030$ et $p=0,864$).

3.1.2.5.4 Les délais entre l'apparition de la DPO et la réponse comportementale du sujet (= Délai Action - DPO)

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le clignotement sur le délai Action - DPO ($F=1,150$ et $p=0,288$). Cependant, le délai Action - DPO pour le voyant orange fixe est beaucoup plus court (M= 1,53 s) que pour le voyant orange clignotant (M = 5,19 s) alors que le délai Action - DPO pour le voyant rouge fixe (M= 2,05 s) est sensiblement le même que pour le voyant rouge clignotant (M = 3,00 s).

3.1.2.5.5 Les délais d'apparition des potentiels

Il n'y a aucun effet significatif de l'interaction entre la couleur et le clignotement sur le délai d'apparition du potentiel ($F=0,637$ et $p=0,429$). Cependant, le délai d'apparition du potentiel pour le voyant orange fixe est plus court ($M= 1,14$ s) que pour le voyant orange clignotant ($M = 2,28$ s), en revanche, le délai d'apparition du potentiel associé au voyant rouge fixe ($M = 1,27$ s) est sensiblement le même que pour le voyant rouge clignotant ($M = 1,08$ s).

3.1.2.6 Tableaux récapitulatifs

Ces résultats sont présentés dans les tableaux en pages 132 à 133.

Effets Couleurs	Orange	Rouge
Temps de réponse	4,386	3,918
Durée DPO	3,156	3,960
Délai apparition DPO	2,591	1,558
Délai Action - DPO	2,444	2,164
Délai apparition Potentiel	1,471	1,250

Effets Bip Sonore	Sans	Avec
Temps de réponse ($p=0,009$)	5,557	2,584
Durée DPO	3,667	3,333
Délai apparition DPO	3,198	0,959
Délai Action - DPO	2,457	2,170
Délai apparition Potentiel	1,819	0,967

Effets Clignotement	Fixe	Clignotement
Temps de réponse	3,985	5,093
Durée DPO	3,326	4,273
Délai apparition DPO	2,115	2,232
Délai Action - DPO *	1,778	4,591
Délai apparition Potentiel	1,195	2,059

3.1.3 Interprétation des résultats

Contrairement à nos hypothèses initiales ¹, le voyant associé à une situation d'urgence (voyant rouge) n'induit pas de réponses significativement différentes (en termes de temps

¹selon lesquelles « les différentes situations expérimentales, induites par la présentation de signaux à caractère plus ou moins urgent, devraient induire une charge attentionnelle différente chez les conduc-

Effets Couleurs X Bip	Rouge Sans Bip	Rouge Avec Bip
Temps de réponse	3,902	3,937
Durée DPO	4,000	3,917
Délai apparition DPO	1.635	1.475
Délai Action - DPO	1.431	2,958
Délai apparition Potentiel	0,993	1.430

Effets Couleurs X Bip	Orange Sans Bip	Orange Avec Bip
Temps de réponse (p=0,02)	6,753	1.547
Durée DPO	3,412	2,867
Délai apparition DPO	4,394	0,547
Délai Action - DPO	3,241	1.540
Délai apparition Potentiel	2,159	0,636

Effets Couleurs X Clignotement	Rouge Fixe	Rouge Clignotant
Temps de réponse	3,833	4,670
Durée DPO	3,818	5,000
Délai apparition DPO	1.514	1.883
Délai Action - DPO	2,050	3,000
Délai apparition Potentiel	1.273	1.075

Effets Couleurs X Clignotement	Orange Fixe	Orange Clignotant
Temps de réponse	4,118	5,225
Durée DPO	2,875	4,000
Délai apparition DPO	2,667	2,362
Délai Action - DPO	1.529	5,188
Délai apparition Potentiel	1.141	2,278

de réponse, de réponses émotionnelles, de délais de perception, etc.) de celles induites par le voyant associé à une situation peu urgente (voyant orange). La présentation de voyants se distinguant par leur couleur (rouge versus orange) ne suffit sans doute pas à créer une différence dans le partage des ressources attentionnelles chez le conducteur.

La réponse comportementale attendue suite à la présentation des voyants diffère selon qu'il s'agit du voyant orange ou du voyant rouge. Dans le premier cas, le sujet doit faire un appel de phares alors que dans le second cas, il doit freiner pour éviter un obstacle réellement présent sur sa voie. Des délais de réponse différents pourraient s'expliquer par le fait qu'il s'agit de réponses comportementales différentes. Mais, le temps de réponse et le délai de perception (lié au délai d'apparition des signaux physiologiques) sont sensiblement les mêmes pour les voyants rouges et oranges. Le voyant rouge n'est pas perçu plus rapidement et n'entraîne pas de réponse plus rapide que le voyant orange. L'hypothèse concernant l'effet du degré d'urgence des signaux n'est pas pour autant à rejeter dans une conduite réelle, il faut plutôt retenir que son opérationnalisation présente par un voyant rouge et par un voyant orange n'est pas concluante.

D'une façon générale, la comparaison des réponses comportementales (temps de réponse) et physiologiques (délai d'apparition de la DPO et du potentiel) montre une certaine cohérence dans les résultats ² :

- La couleur des voyants n'a d'effet ni sur les temps de réponse, ni sur les délais d'apparition de la DPO et du potentiel. Les réponses au voyant rouge sont sensiblement les mêmes que celles au voyant orange.
- En revanche, le bip sonore associé au voyant a un effet important sur les temps de réponse et sur les délais d'apparition de la DPO et du potentiel : la présence d'un bip sonore diminue le temps de réponse, que la réponse soit physiologique ou comportementale. Ces résultats sont cohérents avec notre hypothèse selon laquelle « *la modalité auditive associée à l'allumage de voyants (modalité visuelle) induira une réponse différente que la modalité visuelle seule.* »

teurs » et « *le voyant associé à une situation urgente induirait des réponses différentes (temps de réponse plus courts, stress, réactions émotionnelles, etc.) chez le conducteur que le voyant associé à une situation peu urgente* »

²malgré une absence de significativité des résultats liée au faible nombre de données traitées.

- Le clignotement d'un voyant a également un effet sur les temps de réponse et sur les délais d'apparition de la DPO et du potentiel : le clignotement du voyant augmente le temps de réponse, que la réponse soit physiologique ou comportementale.
- L'interaction entre le bip sonore et la couleur du voyant tend à avoir le même effet sur les temps de réponse et sur les délais d'apparition de la DPO et du potentiel. Le bip sonore associé à un voyant orange diminue le temps de réponse, que la réponse soit physiologique ou comportementale, comparativement à un voyant orange sans bip sonore associé. Mais, cet effet n'est plus observable pour le voyant rouge : l'ajout d'un signal sonore à un voyant rouge n'améliore pas la rapidité des réponses, que les réponses soient physiologiques ou comportementales.

Notre principal problème lors de l'interprétation des résultats est de déterminer si les comportements observés chez les conducteurs sont dus aux signaux que nous présentons ou aux caractéristiques de la situation de conduite. Nous avons choisi, comme le préconisent différents auteurs (De Waard, 1996 ; Eggemeier et Wilson, 1991 ; O'Donnell et Eggemeier, 1986), d'utiliser des tâches secondaires proches des tâches de conduite. Lorsque le conducteur fait un appel de phare, nous pouvons affirmer (puisque nous sommes en conduite sur piste, sans trafic) que c'est en réponse à l'allumage du voyant orange. Nous pouvons alors calculer le temps de réponse du sujet à ce voyant. En revanche, lorsque le véhicule arrive à proximité d'un obstacle signalé au conducteur par un voyant rouge et que le sujet freine, nous ne pouvons pas différencier si c'est une réponse au voyant qui s'est allumé ou parce que la situation de conduite, bien perçue et comprise par le conducteur, exige que celui-ci ralentisse. L'analyse vidéo des mouvements oculaires du sujet nous permet de savoir si le sujet a bien regardé dans la direction du voyant situé sur le tableau de bord, mais nous n'avons pas la certitude que le sujet a réellement perçu ce signal. Il peut freiner parce qu'il a perçu directement l'obstacle et non pas à cause du voyant.

Nous voyons ici l'importance d'avoir un groupe contrôle composé de sujets ayant comme seule consigne de conduire normalement sur le circuit. Aucun signal ne leur serait présenté et nous pourrions ainsi savoir quels sont les comportements de conduite en fonction des portions du circuit. L'introduction d'un tel groupe contrôle a été retenue pour

nos expériences suivantes.

Par ailleurs, notre protocole ne nous permettait pas d'habituer le sujet à l'interface du « système anti-collision » et surtout, cette interface était assez rustique. Elle ne se composait que d'un voyant rouge qui s'allumait en clignotant ou de manière fixe avec un bip sonore associé. Un écran implanté dans le tableau de bord, diffusant des informations plus élaborées (type texte) nous aurait sans doute permis d'obtenir des résultats plus précis. Malheureusement, il n'a pas été possible de modifier fortement le poste de conduite du véhicule expérimental et d'installer dans celui-ci un écran muni d'une interface modifiable. Notre protocole expérimental a donc dû être construit avec la contrainte de ne pouvoir utiliser que deux voyants déjà existants sur le tableau de bord. Nous avons alors sélectionné le voyant des feux anti-brouillard comme voyant peu stressant (voyant orange) et le voyant du frein à main comme voyant stressant (voyant rouge). Nous avons choisi ces deux voyants pour les raisons suivantes :

- Concernant le voyant peu urgent, le voyant des « feux anti-brouillard » peut être allumé durant une situation de conduite sans signifier la présence d'un danger ou d'une défaillance. Sa couleur orange est d'ailleurs associée à un voyant « informatif ».
- En revanche, en situation de conduite réelle, si le voyant « frein à main serré » est allumé ou s'allume alors que nous roulons, le danger est imminent. Nous avons donc pensé que ce voyant garderait sa connotation « Attention danger » pour le conducteur, même si la source du danger n'était pas celle habituelle.

Cette hypothèse ne semble pas vérifiée. Les sujets n'ont probablement pas tous conduit « comme ils en avaient l'habitude ». Les voyants ne semblent pas avoir gardé leur connotation habituelle puisque certains sujets ont répondu plus vite aux voyants peu urgents qu'aux voyants urgents.

Nous voyons donc ici les limites de la conduite en situation expérimentale, même la conduite (sur piste) d'un vrai véhicule et non d'un véhicule simulé. Même si la consigne donnée au sujet lui indiquait quelle devait être sa tâche principale et lui demandait de conduire le plus naturellement possible, certains sujets ont concentré leur attention sur la détection des voyants et ne cessaient de regarder le tableau de bord, au détriment de

leur conduite et de leur sécurité... Il existe à cet égard une variabilité importante entre les sujets concernant leur investissement dans cette tâche secondaire, variabilité difficile à contrôler.

Insistons sur le fait que les paramètres que nous avons choisis dans cette expérience sont généralement utilisés dans la littérature comme des indicateurs de la variation de la charge attentionnelle liée à l'ajout d'une tâche secondaire. Or, nous voulons être capables d'évaluer les variations de charge attentionnelle et surtout savoir comment se répartissent les ressources attentionnelles entre la tâche de conduite automobile et le traitement d'informations présentées à l'intérieur du véhicule. Les différents indicateurs choisis ne permettent pas de distinguer aisément les différents modes de présentation et des réponses assez surprenantes ont été observées. Par exemple, alors que le signal sonore associé au voyant orange avait pour effet de diminuer considérablement le temps de réponse du sujet, comparativement au temps de réponse au voyant orange seul, le signal sonore n'a pas eu d'effet significatif pour le voyant rouge. On peut donc se demander quelle est, en situation d'urgence, la signification que les sujets accordent au bip sonore, s'il est vraiment utile ou non, ou bien si c'est un artefact du protocole expérimental.

3.1.4 Conclusion de la première étude préliminaire

Nous rappelons que l'objectif de cette première étude préliminaire n'était pas l'obtention de données comportementales significatives permettant l'évaluation de dispositifs techniques. Notre but n'était pas encore de pouvoir évaluer les systèmes d'aide, mais d'évaluer des méthodes et des indicateurs susceptibles de nous servir dans nos futures études. Dans ce cadre, les résultats obtenus nous ont permis de valider ou d'écarter certains indicateurs et notamment de retenir les indicateurs physiologiques testés comme pouvant être d'un réel intérêt pour notre problématique, car ils permettent par exemple de compléter les temps de réponse par le délai de perception. Cependant, de nombreuses précautions doivent être prises avant de les utiliser : il peut y avoir une perte importante de données qu'il faut anticiper (dysfonctionnement matériel, capteurs physiologiques défectueux entraînant du « bruit » dans les signaux, sujets ayant une faible réponse électrodermale,

etc.).

La piste est un moyen d'expérimentation intéressant mais limité. Son utilisation permet de créer des situations de conduite précises, comme par exemple une situation critique, voire d'urgence. C'est un moyen particulièrement intéressant dans un contexte d'étude d'évènements précis, de comparaison entre deux systèmes possibles ou de dernières mises au point d'interfaces. Cependant, le second enseignement de cette étude préliminaire est qu'il nous paraît pas pertinent de le retenir pour une évaluation complète d'un nouveau système d'aide, car la prise en compte de l'interaction entre le système et l'activité de conduite est essentielle à cette évaluation. Or, sur piste, le trafic est limité, voire inexistant et le conducteur n'est pas placé en situation de conduite réelle. Notre expérience a d'ailleurs montré certaines limites de ce moyen d'expérimentation dans le sens où dans certains contextes, la conduite devenait la tâche secondaire. Certains conducteurs privilégiaient, en effet, la tâche de temps de réponse, au détriment de la conduite. Ainsi, nous pouvons retenir à l'issue de ces expérimentations que la réponse électrodermale est une mesure physiologique intéressante à conserver pour la suite de nos recherches, bien qu'elle comporte certains inconvénients. En revanche, la conduite sur piste n'est pas assez représentative de l'activité de conduite réelle pour y évaluer nos futurs systèmes d'aide.

3.2 Seconde étude préliminaire : validation des indicateurs retenus pour une évaluation réalisée sur simulateur dynamique

3.2.1 Principes et méthodes de l'étude

Suite à cette première étude, nous avons voulu confirmer l'apport des données physiologiques précédemment retenues sur un plus grand nombre de sujets et dans un autre contexte expérimental. Dans le cadre d'un projet concernant un système d'aide au maintien de trajectoire (alerte en cas de sortie de voie), une expérimentation sur le comportement du conducteur en situation de sortie de voie a eu lieu sur le simulateur dynamique

impliquant un total de 30 conducteurs. Le choix d'une expérimentation sur simulateur était dû à des raisons de sécurité (risque de sortie de voie) et de faisabilité (changement de voie involontaire moins difficile à générer).

Cette expérimentation a été menée conjointement entre des membres du groupe « Ergonomie cognitive » dont je faisais partie, des membres du groupe « Détection de l'environnement et aide à la conduite » de la Direction de la Recherche de RENAULT, en collaboration avec le groupe « Simulation ». Elle devait apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Comment peut-on évaluer un système d'alerte de sortie de voie ? Quels sont les indicateurs à utiliser pour évaluer l'interaction conducteur / système ? Le simulateur de conduite est-il un moyen pertinent pour une telle évaluation ?
- Est-il possible de diagnostiquer le caractère volontaire ou involontaire du franchissement de ligne ?
- Est-il possible de prédire la position d'un véhicule de 0,5 à 2 secondes en avance ?
- Quelles seraient les performances d'un système de type « bande vibrante » comparé à un système avec prédiction ?

Le caractère confidentiel de cette étude ne nous permet pas de divulguer dans le cadre de cette thèse les réponses obtenues pour les deux dernières questions qui intéressaient plus particulièrement le groupe « Détection de l'environnement et aide à la conduite ». Notre attention sera donc centrée sur les deux premières questions.

3.2.1.1 Population d'étude

30 conducteurs, tous volontaires, ont été recrutés parmi le personnel Renault, ici encore pour des raisons de confidentialité. Ils possèdent tous leur permis de conduire et ont une expérience plus ou moins importante de la conduite, mais ils ne sont ni débutants, ni pilotes professionnels.

3.2.1.2 Choix des paramètres à mesurer

- Mesures physiologiques

- La résistance cutanée
- Le potentiel cutané
- Données Vidéo
 - Vue des pédales : embrayage, frein, accélérateur (avec incrustation du compteur de synchronisation)
 - Vue du conducteur de face
 - Vue du conducteur de profil
 - Vue de la scène avant
- Questionnaires
 - Durant la phase de conduite, une série de quatre questions était posée par le copilote à la fin de chaque scénario, afin d’obtenir la perception qu’avait le conducteur de sa sécurité, du niveau d’assistance de la direction, de la stabilité du véhicule et de la facilité (ou difficulté) à maintenir sa trajectoire.
 - Après la phase de conduite, les conducteurs devaient répondre à un questionnaire portant sur leurs habitudes de conduite et sur une éventuelle utilisation d’un système d’aide à la gestion de trajectoire.
- Données véhicule issues du simulateur :
 - Vitesse longitudinale du véhicule
 - Vitesse latérale du véhicule
 - Distance aux lignes
 - Couple volant
 - Angle volant
 - Cap du véhicule
 - Position du véhicule sur le parcours

3.2.1.3 Déroulement de l’expérimentation

Les expérimentations se sont déroulées sur le simulateur dynamique avec l’aide du groupe simulation. Une semaine avant la phase expérimentale, les sujets ont conduit le simulateur durant 15 minutes. Cette phase de familiarisation a d’une part permis aux

conducteurs de se familiariser avec la conduite sur simulateur dynamique et nous a d'autre part permis d'identifier les sujets qui ne supportaient pas la conduite sur simulateur.

La phase expérimentale comportait environ une heure de conduite sur un parcours prédéfini, indiqué au fur et à mesure par le copilote, qui était passager avant dans le simulateur. La distance parcourue était d'environ 40 km, comprenant différents types de route (autoroute, nationale, montagne). Le conducteur avait pour consigne de conduire « comme il en avait l'habitude », les vitesses n'étaient pas imposées, mais il était précisé que les limitations réglementaires de vitesse s'appliquaient également sur simulateur (130 ou 110 sur autoroute, 90 sur nationale, 50 sur la route de montagne). Durant la phase de conduite, 10 scénarios différents se produisaient. Ces scénarios ont été élaborés afin d'être représentatifs de situations réelles de conduite, susceptibles de provoquer une variation, volontaire ou involontaire, de la position latérale du véhicule. Ils pouvaient être de différentes natures : vent latéral générant une dérive du véhicule, croisement de véhicules spécifiques, absence de marquage au sol, brouillard, tâches annexes à la conduite, etc. L'objectif était d'étudier la capacité du conducteur à maintenir son véhicule dans la voie. Bien entendu, les conducteurs n'avaient pas connaissance de l'objectif de cette étude, ni de l'existence de ces scénarios. Après avoir effectué un des scénarios, le conducteur répondait oralement au premier questionnaire durant sa tâche de conduite (les réponses étaient notées par le copilote dans le véhicule).

Durant toute la phase de conduite, les mesures physiologiques et les données véhicules étaient enregistrées et synchronisées et les conducteurs, ainsi que la scène avant, étaient filmés en continu. A l'issue de la phase de conduite, un débriefing avait lieu avec l'expérimentateur et comprenait notamment la passation du second questionnaire, par écrit. Le tableau 3.1 en page 142 décrit les 10 scénarios dans leur ordre d'apparition sur le parcours.

3.2.2 Analyse et interprétation des résultats

Les dépouillements ont été réalisés par l'équipe « Ergonomie cognitive » pour les données physiologiques, vidéo et les questionnaires et par le groupe « Détection de l'environnement et aide à la conduite » pour les données véhicules. La synthèse des différents

Scénarios	Conditions	Événement
7	Consigne de vitesse à 90 km/h. Route nationale 2 x 1 voie Ligne droite	Un Scénic arrêté sur le bas-côté et des véhicules arrivant sur la voie en sens inverse.
10	Consigne de vitesse à 90 km/h. Route nationale 2 x 1 voie Ligne droite	Le conducteur passe au copilote le téléphone qui sonne dans sa portière
2	Consigne de vitesse à 110 km/h Autoroute 2 x 2 voies / ligne droite Brouillard	Trafic moyen, pas d'événement particulier.
1	Consigne de vitesse à 110 km/h Autoroute 2 x 2 voies / ligne droite Brouillard	Vent vers la droite.
5	Consigne de vitesse à 110 km/h Autoroute 2 x 2 voies / ligne droite Brouillard	Vent vers la gauche.
3	Consigne de vitesse à 110 km/h Autoroute 2 x 2 voies / ligne droite Brouillard	Le copilote passe un CD au pilote pour qu'il le mette dans l'autoradio.
4	Consigne de vitesse à 110 km/h Autoroute 2 x 2 voies Puis route nationale 2 x 1 voie Ligne droite	Le copilote demande au pilote de changer de chanson (quand apparaît un Scénic en sens inverse). Vent vers la droite en même temps.
8	Consigne de vitesse à 50 km/h route de montagne 2 x 1 voie	Croisement dans un virage à gauche, sans marquage, d'une voiture. Plots de travaux sur la droite de la route rétrécissant la largeur de la chaussée
6	Consigne de vitesse à 50 km/h route de montagne 2 x 1 voie	Croisement, dans un virage à droite, sans marquage, d'un camion.
9	Consigne de vitesse à 50 km/h route de montagne 2 x 1 voie	Croisement, dans un virage à gauche, avec du vent vers la gauche et sans marquage, d'une voiture.

TAB. 3.1 – Description des scénarios

résultats s'est faite en étroite collaboration entre les deux groupes.

3.2.2.1 Définition des zones d'intérêt

Dans cette étude, nous nous intéressions tout particulièrement au maintien du véhicule dans sa voie. L'objectif était d'évaluer la faisabilité et la pertinence d'un système d'aide à la gestion de trajectoire. Notre attention s'est donc portée sur les instants où le conducteur ou le véhicule avaient un comportement singulier. Outre les situations correspondant aux 10 scénarios, nous avons voulu connaître, sur le reste du parcours, les moments où de telles situations de conduite se produisaient. Ainsi, les écarts latéraux importants ou les angles de volant élevés d'une part et les réactions physiologiques fortes d'autre part, nous intéressaient tout particulièrement. Nous avons donc « filtré » notre base de données, afin de recueillir ces situations particulières de conduite, que nous avons appelées « zones d'intérêt »(Z.I.). Ces zones ont été déterminées en aveugle par deux groupes. Le premier effectuait le tri à partir des données issues du simulateur ³ (écart et angle volant) et l'autre effectuait le tri à partir des données physiologiques. L'analyse des vidéos a permis a posteriori de connaître le contexte de chaque situation retenue et de supprimer celles liées à des biais expérimentaux. Nous avons ensuite croisé les résultats issus de ces deux types de tris et nous avons obtenu la classification présentée dans le tableau page 144. Les ZI de niveau 5 sont celles qui nous intéressent tout particulièrement.

3.2.2.2 Résultats concernant le comportement du conducteur

L'étude du comportement du conducteur a pour but, d'une part, de valider le « réalisme » d'une conduite sur simulateur et, d'autre part, de quantifier l'impact des scénarios sur le comportement des conducteurs.

³le dépouillement des données « écarts » et « angle de volant » a été réalisé avec 2 méthodes sur tout le parcours. Pour la première partie du parcours (jusqu'au scénario 7), la route pratiquée correspond à une nationale 2 fois 1 voie en ligne droite. Cette typologie du parcours donne une certaine uniformité de la vitesse entre les différents conducteurs et autorisait des études se basant sur la référence temporelle. La recherche des zones d'intérêt avant scénario 7 a donc été réalisée sur l'ensemble des conducteurs. De plus, la recherche d'une corrélation entre les grandeurs avant et pendant scénario 7 a été menée. Pour le reste du parcours, les vitesses étant très différentes d'un conducteur à l'autre, un traitement temporel était inadapté. La recherche des zones d'intérêt après scénario 7 sur l'ensemble des conducteurs a donc été réalisée pour une abscisse « s » donnée à partir de l'analyse des données « écart droit » et « angle volant ».

Zones d'intérêt	Descriptions
ZI de niveau 5	ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence à la fois par les données physiques « écart » et « angle volant » et par les données physiologiques
ZI de niveau 4	ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données physiologiques et par les données « écart » ou ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données physiologiques et par les données « angle volant » ou ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données « écart » et « angle volant »
ZI de niveau 3	ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données physiques seules (« écart » ou « angle volant »), associées à de fortes variations
ZI de niveau 2	ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données physiques seules (« écart » ou « angle volant »), associées à de faibles variations
ZI de niveau 1	ZI, filtrées par la vidéo, mises en évidence par les données physiologiques seules
ZI de niveau 0	ZI mises en évidence par les données physiologiques seules ou ZI mises en évidence par les données vidéo seules

TAB. 3.2 – Description des zones d'intérêt

3.2.2.2.1 Apport de l'approche vidéo et des questionnaires

L'enregistrement vidéo durant la phase d'expérimentation permet de connaître le contexte exact de chaque évènement et plus particulièrement ceux classés en Zone d'Intérêt 4 et 5. En outre, la vidéo a permis d'éliminer toutes les situations ayant déclenché des réponses physiologiques ou comportementales (dynamique véhicule) a priori intéressantes, mais susceptibles d'être liées à des biais expérimentaux.

De plus, durant la phase de conduite, le copilote a demandé au conducteur de mettre, puis de changer un CD ou de prendre un téléphone portable dans le vide-poche de sa portière. L'enregistrement vidéo de ces évènements a permis de les dater précisément grâce à l'horloge incrustée dans l'image vidéo pour rechercher ensuite les réponses dynamiques du véhicule et celles du conducteur qui y sont associées.

Durant la conduite sur le simulateur, une série de quatre questions était posée à la fin de chaque scénario, afin d'obtenir la perception qu'avait le conducteur de sa sécurité, du niveau d'assistance de la direction, de la stabilité du véhicule, de la facilité (ou difficulté) à maintenir sa trajectoire. Une comparaison des réponses des conducteurs pour les différents

scénarios a permis de mettre en évidence les situations qui les ont le plus perturbés.

Enfin, afin de connaître les habitudes de conduite des conducteurs et leur avis sur une éventuelle utilisation d'un système d'aide à la gestion de trajectoire, ces derniers ont répondu à un questionnaire, après la phase de conduite.

3.2.2.2.2 Résultats issus des questionnaires La significativité des résultats présentés ci-dessous a été statistiquement évaluée grâce au test du χ^2 .

3.2.2.2.2.1 Résultats issus des questions posées durant la phase de conduite

Durant la conduite sur le simulateur, une série de quatre questions était posée à la fin de chaque scénario, afin d'obtenir la perception qu'avait le conducteur de sa sécurité, du niveau d'assistance de la direction, de la stabilité du véhicule, de la facilité (ou difficulté) à maintenir sa trajectoire.

Concernant la stabilité perçue, les conducteurs jugent le véhicule significativement moins stable pour les scénarios 3, 4 et 7 qui correspondent à l'évitement d'un véhicule garé sur le bas côté ou à la manipulation du téléphone ou des CD. Concernant les trois autres questions (sécurité, maintien de trajectoire, assistance de la direction), les réponses des conducteurs ne diffèrent pas statistiquement d'un scénario à l'autre. De même, les réponses concernant les scénarios où un vent latéral était simulé (scénarios 1 et 5) ne sont pas significativement différentes de celles données pour le scénario 2 (conduite sur autoroute, dans le brouillard). Le vent ne semble donc pas avoir été perçu comme gênant par les conducteurs.

3.2.2.2.2.2 Résultats issus des questions posées après la phase de conduite

Après la phase de conduite, les conducteurs devaient répondre à un questionnaire portant sur leurs habitudes de conduite et sur une éventuelle utilisation d'un système d'aide à la gestion de trajectoire. L'objectif était de connaître les habitudes et les attentes des conducteurs afin de les intégrer dès la conception d'un système d'aide à la gestion de trajectoire.

3.2.2.2.3 Réponses liées aux habitudes de conduite des conducteurs

Les conducteurs disent conduire habituellement au centre de leur voie, utiliser la ligne médiane et le bord de la route comme principaux repères pour savoir où se situe leur véhicule dans la voie, prendre leur virage à la corde.

Selon ces conducteurs, les évènements qui perturbent le plus le maintien de leur trajectoire sont bien évidemment en premier lieu les obstacles sur leur trajectoire, puis le dépassement d'un poids lourd, les rafales de vent, les dévers de la route, l'utilisation de l'autoradio, d'un CD, du téléphone ou de la ventilation. Concernant l'utilisation d'un CD ou du téléphone, ces réponses sont cohérentes avec celles données pendant la conduite, au moment des scénarios 3, 4 et 7. En revanche, bien que les conducteurs disent être généralement gênés, en conduite réelle, par les rafales de vent, nous avons vu précédemment que durant la phase de conduite où un vent latéral était simulé, les réponses des conducteurs ne différaient pas de celles données durant les situations de conduite sans vent. Enfin, lors d'un déport latéral inopiné, les conducteurs disent agir principalement sur le volant et sur le frein, (mais surtout sur le volant) afin de remettre leur véhicule dans sa trajectoire. L'observation de leurs comportements de conduite le confirme.

3.2.2.2.3 Réponses liées à une utilisation éventuelle d'un système d'aide à la gestion de trajectoire

Nous avons demandé aux conducteurs de nous donner leur avis sur les modalités d'utilisation et les propriétés que devrait avoir un système d'aide à la gestion de trajectoire. Tout d'abord, 75 % des conducteurs ne souhaitent pas qu'un tel système soit opérationnel tout le temps. Ils souhaiteraient que le système soit opérationnel seulement en fonction des conditions météorologiques (neige, pluie, vent), du réseau routier (route de montagne, autoroute) et de l'environnement lumineux (nuit, soleil aveuglant) mais pas du trafic. Selon la majorité des conducteurs, le système ne doit pas indiquer tout le temps la position du véhicule dans la voie, mais plutôt lorsque le conducteur le désire. En revanche, en cas de danger, 63,7 % des conducteurs sont d'accord (dont 45,5 % qui sont tout à fait d'accord) pour que le système les prévienne, sans agir sur le véhicule et près de 80 % des conducteurs sont d'accord (dont 43,2 % qui sont tout à fait d'accord) pour que le système agisse sur

leur véhicule s'ils n'ont pas réagi dans un délai acceptable pour éviter l'accident.

3.2.2.2.4 Résultats issus des enregistrements physiologiques

Rappelons que la réponse électrodermale en résistance est le reflet de la charge attentionnelle alors que celle en potentiel est le reflet de la charge émotionnelle. L'utilisation de ces signaux électrodermaux dans la présente étude a deux objectifs : d'une part, aider à la détection des sorties de voies, d'autre part, différencier les sorties de voie volontaires de celles involontaires. Ce second point sera abordé un peu plus tard. Le traitement et l'analyse de la réponse électrodermale nécessitant une expertise en physiologie, ils ont été réalisés en collaboration avec un expert en physiologie (C. Petit). Toutes les réponses attentionnelles et émotionnelles de ces 30 conducteurs ont été détectées et quantifiées en « aveugle », c'est à dire sans aucune référence de situation, qu'elles apparaissent lors des scénarios ou en conduite dite nominale. Chaque instant d'apparition de ces réponses est ensuite repéré sur la vidéo où l'on constate qu'il est généralement associé à une action ou réaction du conducteur à son environnement. Toutes les réponses associées au protocole (téléphone, CD, etc.) ou à des comportement de conduite bien précis (changement de vitesse, prise d'information sur le tableau de bord ou dans les rétroviseurs, réponse à une question du copilote, etc.) sont mises à part. Les réponses électrodermales restantes sont forcément associées à la scène routière ou aux situations de conduite générées par le simulateur. La significativité des résultats présentés ci-dessous a été statistiquement évaluée grâce au t de Student.

3.2.2.2.4.1 Nature de la charge cognitive en conduite nominale

On a sélectionné dans le trajet effectué par les conducteurs avant le scénario 7 une portion de route d'environ 5 minutes pendant laquelle la conduite peut être qualifiée de nominale. La scène routière ne nécessitait, en effet, aucune action de type dépassement ; les conditions atmosphériques étaient normales et le copilote ne donnait pas de consigne particulière pouvant interférer avec la conduite. La vitesse était de 90km/h, essentiellement en ligne droite ou en faible courbe.

Lors de cette conduite nominale, la ligne de base de la résistance électrodermale fluc-

tue suivant le niveau d'attention et présente peu de réponses ponctuelles. Celles-ci correspondent à une faible charge attentionnelle liée à un stimulus particulier.

On a répertorié ainsi 372 réponses attentionnelles (somme de toutes les réponses de tous les conducteurs - en moyenne 12 réponses par personne) liées à un mode de conduite nominale dont la durée moyenne est de 3,1 sec (écart-type = 1.6).

Comme cette conduite dite nominale se situait en début de conduite, on a voulu s'assurer qu'il n'y avait pas un effet de « sur-attention » dû à la nouveauté et à la prise en main de la conduite sur simulateur. On a donc sélectionné une autre portion de conduite nominale (similaire à la première portion) d'une durée de 5 minutes, un peu plus tardive dans l'expérimentation (avant le scénario 10).

On a répertorié cette fois-ci 459 réponses attentionnelles (somme de toutes les réponses de tous les conducteurs, en moyenne 15 réponses par personne) liées à la conduite nominale. Leur durée moyenne est de 2,6 sec (écart-type = 1.3).

Cette diminution de la durée de la charge attentionnelle est significative ($p < 0,0001$). On en déduit donc que la conduite sur simulateur nécessite une période de prise en main si l'on veut étudier le comportement du conducteur. Par contre, l'habitué est réelle puisque la charge attentionnelle décroît significativement pour une tâche de conduite comparable (portions de route similaires). On se fixera donc sur la deuxième portion de conduite comme référence de conduite nominale.

Dans le cadre de cette conduite nominale, la durée moyenne des réponses attentionnelles obtenues lors de cette expérimentation sur le simulateur est comparable à celles enregistrées lors d'expérimentations sur piste. Le réalisme du simulateur concernant les phases de conduite nominale est ainsi validé de façon objective par le coût attentionnel associé à la conduite, à condition de respecter un délai de prise en main.

3.2.2.2.4.2 Nature de la charge cognitive associée aux différents scénarios de conduite

Grâce à la réponse électrodermale en résistance, on peut quantifier et comparer le coût cognitif associé à chaque scénario de conduite, par rapport à la conduite nominale. Rappelons que plus la DPO est longue, plus la charge attentionnelle est élevée. Le tableau

suivant présente la DPO moyenne (en seconde) de tous les conducteurs pour chaque scénario.

Scénario	Événement	DPO moy.
7	Un Scénic arrêté sur le bas côté	7,1 s
10	Un téléphone portable sonne dans la portière	5,8 s
1	Vent vers la droite	3,8 s
5	Vent vers la gauche	3,2 s
3	CD à mettre dans l'autoradio	4 s
4	Changer de chanson + vent vers la droite	3,2 s
0	Conduite nominale	2,6 s

TAB. 3.3 – Charge attentionnelle (DPO en seconde) selon l'événement

Toutes les réponses associées à chacun de ces scénarios sont significativement supérieures à celles obtenues en conduite nominale ($p < 0,0001$ sauf pour le scénario 4 où $p = 0,02$). Tous ces événements auxquels les conducteurs ont été soumis se traduisent donc par une élévation importante de la charge attentionnelle : le conducteur ne se trouve plus en mode de conduite automatique. On peut aussi hiérarchiser les scénarios en termes de coût attentionnel : le dépassement du Scénic et le passage du téléphone portable au copilote s'accompagnent d'un traitement cognitif plus important que les scénarios du changement de CD et du vent latéral. Tous ces scénarios obligent le conducteur à sortir de sa conduite dite de type automatique (Niveau I, selon la classification d'Allen et al., 1971). On voit par exemple que la gestion du Scénic garé sur le bas côté entraîne un traitement cognitif élaboré. Cette situation nécessite de changer volontairement de voie. Avant de réaliser cette manœuvre, le conducteur doit évaluer son environnement et notamment s'assurer qu'il peut déboîter sans danger. Le conducteur doit ainsi effectuer des tâches de niveau II (selon la classification d'Allen et al., 1971), qui nécessitent un niveau d'attention plus élevé et qui entraînent donc des DPO plus longues.

3.2.2.2.4.3 Nature de la charge émotionnelle associée aux différents scénarios de conduite

Grâce à la réponse électrodermale en potentiel, on peut quantifier et comparer le coût émotionnel associé à chaque scénario de conduite. Chaque fois qu'une réponse en potentiel est détectée, on peut dire que le conducteur a eu une réaction émotionnelle à

un événement. Parmi ces réponses, on sait en outre discriminer les faibles et les fortes émotions.

Scénario	Évènement	Taux de réponses émotionnelles
7	Un Scénic arrêté sur le bas côté	44% dont 81% fortes
10	Un téléphone portable sonne dans la portière	46% dont 75% fortes
1	Vent vers la droite	22% dont 28% fortes
5	Vent vers la gauche	27% dont 26% fortes
3	CD à mettre dans l'autoradio	26% dont 37% fortes
4	Changer de chanson + vent vers la droite	26% dont 21% fortes

TAB. 3.4 – Taux de réponses émotionnelles selon le scénario

Une fois encore, ce sont les deux mêmes scénarios qui génèrent le plus de réponses émotionnelles : le dépassement du Scénic garé sur le bas côté et l'épisode du téléphone portable caché dans la portière du conducteur, qui se met à sonner et qu'il faut passer au copilote.

3.2.2.3 Conclusions sur le comportement du conducteur

Le réalisme du simulateur concernant la conduite nominale est validé de façon objective par le coût attentionnel associé à ce type de situation, à condition de respecter un délai de prise en main. La durée moyenne de la réponse attentionnelle obtenue ici est comparable à celles enregistrées lors d'expérimentations sur piste (Flégel, Petit, Priez et Hébrard, 1999). De plus, on peut hiérarchiser les scénarios selon le coût attentionnel : le dépassement du Scénic et le passage du téléphone portable au copilote s'accompagnent d'un traitement cognitif plus important que les scénarios du changement de CD et du vent latéral. Tous ces scénarios obligent néanmoins le conducteur à sortir de sa conduite nominale, de type automatique. Les deux scénarios qui génèrent le plus de réponses émotionnelles sont le dépassement du Scénic garé sur le bas côté et l'épisode du téléphone portable qui sonne dans le vide-poche de la portière du conducteur. Près d'un conducteur sur deux a été « stressé » par ces événements et dans les trois quarts des cas, ce « stress » était fort. Comme on l'a déjà vu avec la réponse attentionnelle, le vent latéral a été peu perçu comme un facteur de stress par les conducteurs et l'utilisation des CD ne s'accompagne pas d'un stress particulièrement fort.

Ces résultats sont confirmés par les réponses données aux questions durant la conduite. Les scénarios liés au dépassement du Scénic, à la manipulation du téléphone ou des CD ont réellement été perçus comme les plus perturbants pour le conducteur. Le vent latéral n'a pas été perçu comme perturbant, puisque les réponses aux questions liées à ces scénarios ne diffèrent pas de celles données en conduite nominale.

3.2.2.4 Distinction des sorties de voies volontaires / involontaires

Un système d'aide à gestion de trajectoire ne doit pas prévenir le conducteur à chaque fois qu'il sort de sa voie, mais uniquement en cas de sorties de voie involontaires. Cependant, il est très difficile de distinguer les sorties de voies volontaires de celles involontaires. Pour différencier les comportements volontaires de ceux involontaires, le seul élément facilement utilisable est le clignotant. Lorsque le conducteur met son clignotant, la sortie de voie est volontaire. Mais cet indicateur n'est pas suffisamment fiable pour servir de base au fonctionnement d'un système. Le but de cette étude était notamment de différencier les sorties de voies volontaires de celles involontaires à partir des données physiques du véhicule comme l'« angle-volant » en s'aidant des données physiologiques pour trier les données.

Nous avons commencé par sélectionner parmi nos données des sorties de voie clairement identifiées comme volontaires et d'autres clairement involontaires. Nous nous sommes basés pour cela sur les scénarios et sur les données physiologiques. Nous avons ensuite analysé les données de dynamique véhicule (angle de lacet relatif, vitesse latérale) et l'angle volant pour voir si l'on pouvait déterminer des seuils sur ces valeurs cohérents avec notre classification volontaires / involontaires effectuée à priori.

3.2.2.4.1 Classification par les situations de conduite

Nous avons sélectionné dans un premier temps les séquences facilement identifiables à partir des situations de conduite. Les comportements volontaires concernaient les manœuvres d'évitement de véhicule (Scénic garé sur le bas côté : scénario 7) et les changements de voie. Pour ces dernières données, nous avons extrait les situations de changement de voie dans les zones d'intérêt de niveau 5. Les comportements involontaires concernaient

les déviations de trajectoire dues à des tâches annexes. Nous avons donc extrait les zones correspondantes à la réaction au téléphone qui sonne dans le véhicule (scénario 10) et à la mise en place d'un CD ou au changement de chanson (scénario 3 et 4). Les zones sélectionnées ont été validées par la vidéo : certaines situations de conduite étaient influencées par un événement extérieur, non représentatif d'une conduite normale ; elles ont donc été écartées.

3.2.2.4.2 Classification selon les réponses physiologiques du conducteur

Pour compléter la base de données de séquence décrite ci-dessus, nous avons eu recours aux réponses émotionnelles et attentionnelles des conducteurs.

3.2.2.4.2.1 Apport de la réponse émotionnelle

Comme nous l'avons vu précédemment, toute réponse attentionnelle apparaît à la suite d'une détection d'un stimulus extérieur, soit juste avant de réaliser une action volontaire. Si la situation engendre une émotion, une réponse en potentiel suit de très près cette réponse en résistance (quelques dixièmes de secondes). Il arrive pourtant que la réponse en potentiel (émotion) précède la réponse en résistance (attention). Nous pensons que dans ce cas, cela implique que le conducteur a été surpris. L'événement a provoqué une charge émotionnelle avant la charge attentionnelle qui elle est associée à la décision de réagir à cet événement « stressant ».

Dans cette étude, la situation qui nous intéresse concerne une dérive involontaire du véhicule de la voie de roulage, non perceptible au départ par le conducteur, mais qui finit par se solder par une sortie de voie, un déport important sur la voie ou une récupération du contrôle de la trajectoire. Cet événement entraîne une réponse émotionnelle immédiatement suivie par une réponse attentionnelle associée en général à un retour sur la voie de roulage. Toutes les situations où la réponse émotionnelle précède la réponse attentionnelle ont donc été repérées pour ensuite les comparer à la dynamique transversale du véhicule au même moment. Les dérives et sorties de voie qui ont eu lieu pendant ces réponses émotionnelles ont été classées comme involontaires.

3.2.2.4.2.2 Apport de la réponse attentionnelle

Une autre technique pour différencier les sorties de voie involontaires et volontaires utilise la réponse attentionnelle. Lors des scénarios avec un vent latéral, certaines rectifications de trajectoire se sont faites de façon volontaire parce que le vent était perçu par le conducteur, perception confirmée par les données vidéo. D'autres rectifications ont pu être faites de manière plus automatique par le conducteur. Ces deux cas de figure devraient ainsi engendrer des durées de réponses attentionnelles différentes. Pour affiner le plus possible la perception du déport latéral dû au vent, trois catégories de réponses électrodermales ont été établies en fonction de leur durée (DPO). Ces catégories ont été élaborées en comparant la DPO moyenne de chaque conducteur associée à une situation de conduite nominale à chacune des DPO générées lors des déports dus au vent latéral. Il était nécessaire de comparer les DPO conducteur par conducteur à cause de la grande variabilité interindividuelle observée sur les réponses du système nerveux autonome. Les différentes catégories sont les suivantes :

1. Lorsque les DPO sont inférieures ou égales à celles obtenues en conduite nominale, le conducteur n'a pas consciemment perçu le vent latéral et corrige automatiquement sa trajectoire (258 cas répertoriés).
2. Lorsque les DPO sont supérieures de 1 ou 2 secondes à celles obtenues en conduite nominale, le conducteur peut avoir perçu le vent et rectifier volontairement sa trajectoire (91 cas répertoriés).
3. Lorsque les DPO sont supérieures de 3 secondes à celles obtenues en conduite nominale, le conducteur a perçu l'écart de trajectoire et la corrige volontairement (52 cas répertoriés).

Nous pouvons d'ailleurs rapprocher cette catégorisation de celle d'Allen et al. (1971) et de celle de Michon (1985). La catégorie 1 correspond aux microperformances (Allen et al.) et au niveau opérationnel (Michon) et est donc associée aux tâches de type automatique alors que les catégories 2 et 3 correspondent aux performances situationnelles (Allen et al.) et au niveau tactique (Michon) et sont donc associées aux tâches de type automatique ou contrôlé.

Nous avons retenu uniquement les situations où les DPO correspondaient à une action de conduite « automatisée » (« involontaire » = 1) ou « contrôlée » (« volontaire » = 3). Connaissant leur instant d'apparition, il a été possible de repérer toutes les déviations de trajectoire correspondantes et de les classer dans les groupes « sorties de voie volontaires » versus « sorties de voies involontaires ».

3.2.3 Conclusion de l'étude

Les objectifs de cette étude étaient :

- de valider la réponse électrodermale comme indicateur de la charge attentionnelle et émotionnelle sur un plus grand nombre de sujets et dans un autre contexte expérimental (un simulateur dynamique de conduite)
- de vérifier que le simulateur dynamique est un moyen pertinent pour analyser le comportement des conducteurs.

Les mesures physiologiques évaluées peuvent être retenues comme des indicateurs pertinents et fiables du comportement du conducteur et en particulier de sa charge attentionnelle et émotionnelle. La réponse électrodermale en potentiel et en résistance a donné des résultats très intéressants. D'une part, les DPO nous ont permis de caractériser différentes tâches de conduite en fonction du niveau d'attention requis. Grâce à la durée de la perturbation ohmique en résistance (DPO) qui est représentative du niveau d'attention investi pour réaliser une tâche, on a pu distinguer les tâches automatiques des tâches contrôlées. Plus la tâche est automatisée, plus la DPO est courte. Ces mesures nous ont permis de distinguer les sorties de voie volontaires des sorties de voies involontaires. Lorsque la réponse émotionnelle précède la réponse attentionnelle, ou que la réponse attentionnelle associée à une manœuvre est comparable à la réponse attentionnelle moyenne observée en conduite nominale, on peut considérer que la sortie de voie est involontaire. Ces mesures physiologiques sont donc pertinentes pour notre problématique puisque nous voulons caractériser l'attention supplémentaire qu'induit l'interaction avec un système d'aide.

Concernant l'utilisation du simulateur dynamique, elle nous a permis de générer et d'étudier des sorties de voie, en toute sécurité. Les mesures physiologiques ont montré que

l'attention requise pour conduire sur simulateur dynamique, une fois la période d'adaptation dépassée, était sensiblement la même que celle requise lors de la conduite sur piste. Ce moyen d'expérimentation peut donc être utilisé lors d'évaluations de système d'aide ou d'études du comportement du conducteur, mais certaines limites doivent être soulignées. Par exemple, la prise d'informations dans les rétroviseurs intérieur et extérieurs est une activité importante lors de la conduite, a fortiori dans les situations de sortie de voie. Il était donc important que la rétrovision soit bien mise au point sur le simulateur avant le début de notre étude. La rétrovision permet d'obtenir la scène arrière dans les rétroviseurs grâce à la projection de cette scène sur un écran placé derrière le véhicule. La mise en place de cet écran a permis d'augmenter le réalisme du simulateur. Cependant, lors d'un changement de voie, le conducteur consulte ses rétroviseurs, mais complète parfois son observation de façon directe, en tournant légèrement la tête, afin de vérifier l'absence de véhicule dans son angle mort. Or, le simulateur utilisé ne permet pas de représenter la vision latérale de la scène de conduite. Lorsque le conducteur tourne la tête, il voit la salle de contrôle du simulateur, faiblement éclairée, ce qui peut lui rappeler soudainement le contexte simulé de l'expérimentation. Ce point devra être réglé à l'avenir si l'on veut étudier le comportement du conducteur car il nous semble que ce retour soudain à la réalité est préjudiciable à la représentativité de l'expérimentation. Enfin, d'autres paramètres comme les retours de force dans les commandes (volant, pédales), la sensation de vitesse, les vibrations du véhicule, doivent être améliorés pour rendre la conduite plus réaliste.

3.3 Conclusion du chapitre

Concernant les mesures, on peut retenir que les mesures physiologiques testées (potentiel et résistance cutanés), malgré un risque important de perte de données, donnent des résultats intéressants, en accord avec les autres mesures (subjectives et de performance). Elles permettent de mettre en évidence les temps de perception, les charges attentionnelles et émotionnelles, liés à des stimuli ou des contextes de conduite. Nous pensons donc qu'elles sont appropriées à notre problématique, même si elles nécessitent d'avoir de nombreuses mesures et de nombreux sujets. De même, les questionnaires et les mesures de

performance évaluées (temps de réponse) sont des mesures pertinentes pour l'évaluation de futurs systèmes d'aide.

Concernant les moyens d'expérimentations, la piste présente certains avantages (répétabilité des situations, sécurité des conducteurs, contrôle des paramètres expérimentaux), mais n'est pas un moyen d'expérimentation suffisant pour une évaluation globale d'un système d'aide. Il manque notamment le trafic routier et l'interaction avec les autres usagers. En outre, le conducteur a du mal à conduire « comme il en a l'habitude », puisque les contraintes associées à la piste sont faibles (peu de danger, pas de trafic) et que le contexte de conduite est loin de la réalité. La piste est cependant un moyen d'expérimentation pertinent si l'on veut évaluer des situations bien précises, comparer des interfaces, etc.

Le simulateur dynamique quant à lui est un moyen d'expérimentation très utile lorsque l'on veut mettre des conducteurs dans des situations de conduite accidentogènes, tout en assurant leur sécurité. Les mesures physiologiques utilisées et plus particulièrement la DPO, ont montré que les charges attentionnelle et émotionnelle associées à la conduite nominale sur simulateur étaient proches de celles associées à des situations de conduite sur piste. Cependant, c'est un moyen d'expérimentation très lourd à utiliser, la mise en place de l'expérimentation pouvant être laborieuse, les modifications des interfaces et de l'habitacle du simulateur difficiles. De plus, l'introduction des mesures physiologiques y pose parfois problème et les sensations de conduite ne sont pas toujours les mêmes que dans la réalité, même si un simulateur dynamique améliore considérablement ces sensations par rapport à un simulateur statique. On retiendra donc que ce moyen d'expérimentation semble être adapté à des études visant à déterminer la faisabilité et l'utilité d'un futur système d'aide, ou à évaluer différentes interfaces. Que ce soit la piste ou le simulateur, on reste dans des conditions expérimentales très contrôlées, sans imprévu et nous ne sommes pas dans des conditions réelles d'utilisation. C'est pourquoi, pour aller vers un meilleur réalisme, il nous a semblé important de réaliser la phase finale d'évaluation sur route ouverte, dans un contexte routier réel. Dans la mesure où la sécurité des conducteurs n'est pas remise en cause, l'évaluation finale des systèmes d'aide doit passer par une phase

d'analyse de l'activité réelle de conduite. Les mesures utilisées devront alors être les moins intrusives possibles.

Chapitre 4

Interfaces innovantes et systèmes d'assistance

Nous avons vu précédemment que la règle d'or de tout système d'aide et notamment des interfaces est la suivante : le système doit aider le conducteur et ne doit pas provoquer de comportement potentiellement dangereux. Le système doit être conçu de telle sorte que l'attention requise pour consulter ses interfaces reste compatible avec la charge attentionnelle nécessaire à la conduite. Cela implique que les interfaces doivent être rapidement perçues, être porteuses d'un message qui aide le conducteur à comprendre rapidement la situation dans laquelle il se trouve, a fortiori si le temps disponible est faible et surtout, elles ne doivent pas détourner l'attention du conducteur « inutilement » mais au contraire lui faire gagner du temps par rapport au traitement de la même situation de conduite sans système d'aide. Il serait tout à fait inacceptable, en effet, que le système d'aide augmente le temps nécessaire au conducteur pour agir, a fortiori dans une situation d'urgence.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons été concrètement confronté à cette problématique lorsque le groupe « Détection de l'environnement et aide à la conduite » de la Direction de la Recherche de Renault, suite notamment à des études accidentologiques, a mis en évidence le besoin d'assister le conducteur dans deux contextes de conduite particulièrement accidentogènes : le suivi de véhicule et l'arrivée sur virages dangereux. Deux systèmes d'aide ont alors été envisagés, le Time Warning et le Curve Warning. Leur ob-

jectif est de prévenir le conducteur que sa conduite n'est pas adaptée à l'environnement routier. Le Time Warning est un système d'aide au respect des inter-distances qui doit prévenir le conducteur lorsque ce dernier ne respecte pas les distances de sécurité et roule trop près du véhicule le précédant (temps de suivi¹ < 2 s). Le Curve Warning doit avertir le conducteur lorsqu'il arrive trop vite sur un virage et plus précisément lorsque la vitesse du véhicule est trop élevée par rapport au rayon de courbure du virage à venir.

La demande du groupe chargé de concevoir ces systèmes était de savoir comment prévenir le conducteur qu'il se trouve dans une situation critique, quelles devaient être les interfaces de ces systèmes, quand elles devaient intervenir, sous quelles formes et combien de niveaux d'alertes ces systèmes devaient comprendre. Il est rapidement apparu que les interfaces classiquement utilisées (voyants sur le tableau de bord, bip sonore) ne répondaient pas suffisamment bien aux exigences de ces systèmes. Nous avons donc travaillé à la conception d'interfaces innovantes qui correspondaient mieux aux besoins de ces systèmes. Dans un premier temps, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au système Time Warning qui était techniquement plus avancé. Nous avons participé à sa conception, dès la définition des cahiers des charges, recherché les modalités sensorielles les mieux adaptées à ce type d'alertes et évalué les différentes solutions possibles. En particulier, nous avons évalué l'apport de retours informationnels haptiques et celui d'une présentation des informations visuelles dans la zone « bas de pare-brise », en les comparant à des interfaces plus classiquement utilisées dans les véhicules. Suite aux conclusions des précédentes études², nous avons choisi d'évaluer ce système d'aide et ses interfaces dans un contexte de conduite réelle, sur route ouverte.

A l'issue de cette évaluation, nous avons voulu aller un peu plus loin dans l'évaluation des interfaces innovantes que nous avons appliquées au Time Warning. Tout d'abord, même si la pédale d'accélérateur active a été acceptée et comprise par les conducteurs dans le cadre du système Time Warning, nous avons voulu savoir quelles seraient son acceptation et son efficacité dans un autre contexte. Cette question s'est également posée pour l'affichage des icônes visuelles dans la zone « bas de pare-brise »(A1). Une première

¹Temps de suivi = Distance intervéhiculaire / Vitesse du véhicule équipé

²Voir chapitre 3

évaluation du système Curve Warning nous a donné l'opportunité de poursuivre l'étude de la présentation des icônes visuelles dans cette zone et de la pédale active associées à un autre système d'aide, dans un environnement de conduite différent. Les résultats ont montré les limites de la pédale et la nécessité de l'adapter aux différentes contraintes associées à chaque système d'aide. Puis, après avoir mis en évidence l'apport positif d'un affichage en « bas de pare-brise » pour les deux systèmes étudiés, nous avons évalué deux solutions techniques d'affichage dans cette zone : un affichage sur un écran LCD et un affichage via la technologie HUD (Head Up Display)³. Cette évaluation s'est déroulée en deux phases : une première phase d'évaluation sur piste où les temps de réponse de conducteurs non habitués à ces deux types d'affichage étaient mesurés et une seconde phase de conduite sur route ouverte, effectuée par des experts en facteurs humains qui devaient évaluer ces deux affichages, dans différents contextes de conduite (jour, nuit, temps ensoleillé, pluie, etc.).

4.1 Le Time Warning : un système nécessitant des interfaces innovantes

4.1.1 Présentation du système

L'étude de données accidentologiques (Collisions fronto-arrière en France, 1995) a mis en évidence un besoin d'une alerte pour la prévention des collisions frontales. Ce type de chocs est principalement dû à l'inattention du conducteur et/ou à des distances de suivi entre véhicules inadaptées. Les collisions arrière représentent 4 % des accidents mortels, 12 % des accidents corporels (tués + blessés) et 30 % des accidents matériels. Elles représentent également 20 % des indemnités versées par les assureurs français et un coût social global en Europe de 5 à 10 milliards d'euros / an. Sur autoroute en 2003, 28% des accidents résultaient de collisions arrière ou en chaîne et un décès sur sept était dû au non respect de la distance minimale de sécurité.

³Head Up Display : système de lecture « tête haute » projetant les informations nécessaire à la conduite du véhicule sur le pare-brise, dans le champ de vision direct du conducteur.

Par ailleurs, l'importance du temps de suivi a connu récemment un regain d'intérêt du fait de la possibilité pour les forces de police de mesurer in situ la distance intervéhiculaire qui doit être en France d'au moins 2 secondes. Or, il est extrêmement difficile pour un conducteur d'évaluer sans assistance cette distance, puisqu'elle varie en permanence, avec la vitesse (Temps de suivi = Distance / Vitesse). Selon un rapport récent de « La Sécurité Routière »(2004)⁴, tous réseaux et toutes conditions de circulation confondues, un conducteur sur quatre ne respecte pas la distance minimale de sécurité, soit deux secondes, avec le véhicule qui le précède ; 5,7% des conducteurs sont même en dessous d'une seconde. Lorsque la circulation est dense, ce sont 57,8% des conducteurs qui ne respectent pas les deux secondes et 14,1% qui sont en dessous de la seconde. Cette infraction est davantage commise sur routes départementales et nationales que sur autoroutes et à des vitesses comprises entre 80 et 120 km/h. La nécessité d'assister le conducteur dans le maintien de la distance minimale de sécurité étant devenue un enjeu important, notre objectif était de concevoir un système intuitif pour aider ou alerter efficacement le conducteur roulant trop près des autres véhicules sans détourner son attention et en le laissant maître de sa tâche conduite.

4.1.2 Mise au point du Time Warning

4.1.2.1 Définition du cahier des charges fonctionnel

On peut, de manière simplifiée, classer les situations routières étudiées en 4 catégories :

- **Situation I** : il n'existe aucun obstacle à l'avant de la scène routière. (*Exemple : roulage sur route « déserte » ...*)
- **Situation II** : il existe un obstacle à l'avant, mais celui-ci ne se trouve pas sur la trajectoire. (*Exemple : voiture garée sur le bas côté, ...*)
- **Situation III** : il existe un obstacle sur la trajectoire mais il ne représente pas de danger potentiel. (*Exemple : suivre le véhicule précédent, en gardant une distance sécuritaire, ...*)

⁴Rapport de la Sécurité Routière (publié en mai 2004) : « Les grandes données de l'accidentologie 2003 : Caractéristiques et causes des accidents de la route »

- **Situation IV** : il existe un obstacle sur la trajectoire et il y a risque sérieux de collision. (*Exemple : le véhicule précédent (que l'on suivait de trop près) effectue un freinage d'urgence, ...*)

Le système Time Warning doit assister le conducteur dans les situations de type IV et peut intervenir dans les situations III, pour indiquer un retour à une distance de sécurité correcte. Nous allons détailler ci-dessous les situations de type IV où le système doit être à même de prévenir le conducteur d'un danger. Nous avons recensé les cas typiques pour lesquels une alerte est souhaitable. De manière simplifiée, on peut dire que les collisions fronto-arrières se produisent dans les configurations suivantes (Wilson, 1997) :

- arrivée sur un obstacle déjà à l'arrêt ;
- suivi d'un véhicule « cible » roulant quasiment à la même vitesse ;
- arrivée sur un véhicule « cible » roulant moins vite ;
- arrivée sur un véhicule « cible » qui décélère ;
- insertion d'un véhicule « cible » dans la trajectoire ;
- changement de voie du véhicule équipé ;

Pour chacune de ces situations, trois types de scénarios, associés à trois seuils d'anticipation possibles, sont envisagés. Ces trois types de scénarios ne sont pas incompatibles et correspondent à trois niveaux d'alerte qui co-existeraient dans un même système :

- Situation A : le système avertit dès que le capteur perçoit un obstacle sur la trajectoire ;
- Situation B : le système avertit dès que le seuil de pré-alarme (seuil « distance non sécuritaire ») est atteint (Temps de suivi < 2 secondes) ;
- Situation C : le système avertit dès que le seuil d'alarme (seuil « collision imminente ») est atteint (Temps de suivi < 1 seconde).

Ces différentes configurations sont représentées en s'appuyant sur le modèle décrit en page 164.

La portée limite du capteur, ainsi que les seuils « Distance non sécuritaire » ou « Collision imminente », sont représentés en prenant pour référence le véhicule équipé. Autrement dit, on considère qu'il y a risque de collision imminente si un obstacle se trouve dans la

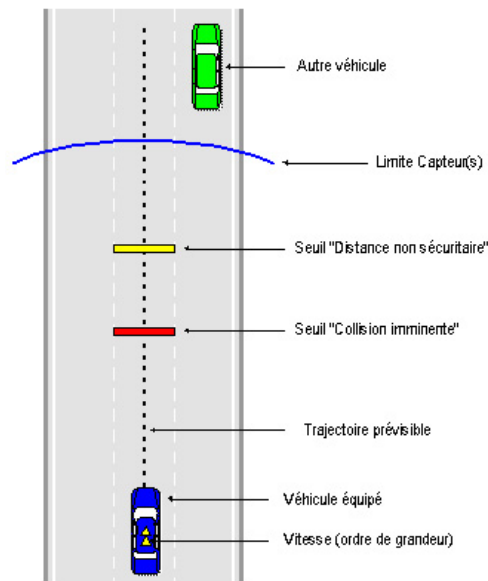


FIG. 4.1 – Modèle d'arrivée sur un véhicule

zone comprise entre le pare-chocs avant du véhicule équipé et la position virtuelle du seuil « Collision imminente ».

Suite aux réunions permettant de définir le cahier des charges fonctionnel (CDCF) du système Time Warning, trois niveaux d'alerte, correspondant à chacun de ces trois seuils plus ou moins critiques, ont été définis. Il fallait ainsi mettre au point des interfaces qui préviennent progressivement le conducteur en fonction de la criticité de la situation de conduite. Dans un premier temps, des interfaces classiquement utilisées (visuelles et sonores) ont été élaborées, mais très vite, nous avons été confrontés à leurs limites, surtout pour les situations C. Comme nous l'avons vu précédemment, ce type de systèmes nécessite d'avoir des interfaces particulièrement adaptées à ces contextes critiques de conduite et les interfaces classiques ne le sont pas. Détourner le regard de la route du conducteur pour l'informer qu'il roule trop près du véhicule qui le précède et qui peut freiner à tout moment, ne nous paraissait pas pertinent.

Dans le chapitre 2, nous avons vu les limites des interfaces classiques et les nouvelles pistes envisageables pour répondre à notre problématique. Ainsi, les interfaces haptiques semblaient mieux adaptées aux contextes de conduite dans lesquels le Time Warning devrait intervenir. Cependant, il existe différents types d'interfaces haptiques et il fallait

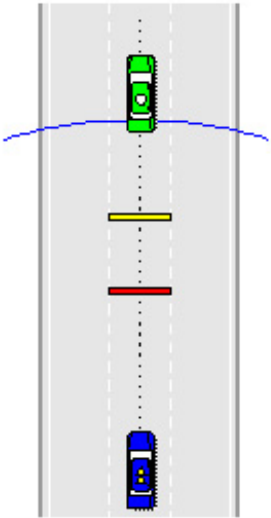
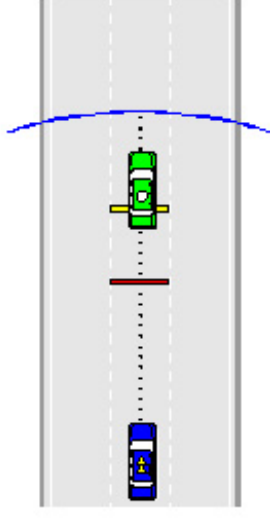
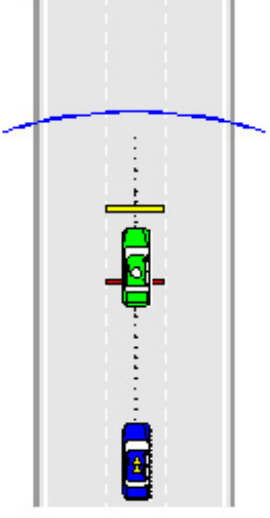
		
<p>Situation A : dès que l'obstacle est à <u>portée</u> du capteur, le système avertit le conducteur de la présence d'un obstacle fixe dans sa trajectoire.</p>	<p>Situation B : dès que le critère correspondant à la <u>pré-alar</u>me est atteint, le système avertit le conducteur de la présence d'un véhicule potentiellement dangereux dans sa voie.</p>	<p>Situation C : dès que le critère correspondant à l'<u>alar</u>me est atteint, le système avertit le conducteur du risque d'une collision et informe les autres usagers de l'environnement arrière qu'une situation critique a été détectée.</p>

FIG. 4.2 – Arrivée sur un obstacle déjà à l'arrêt

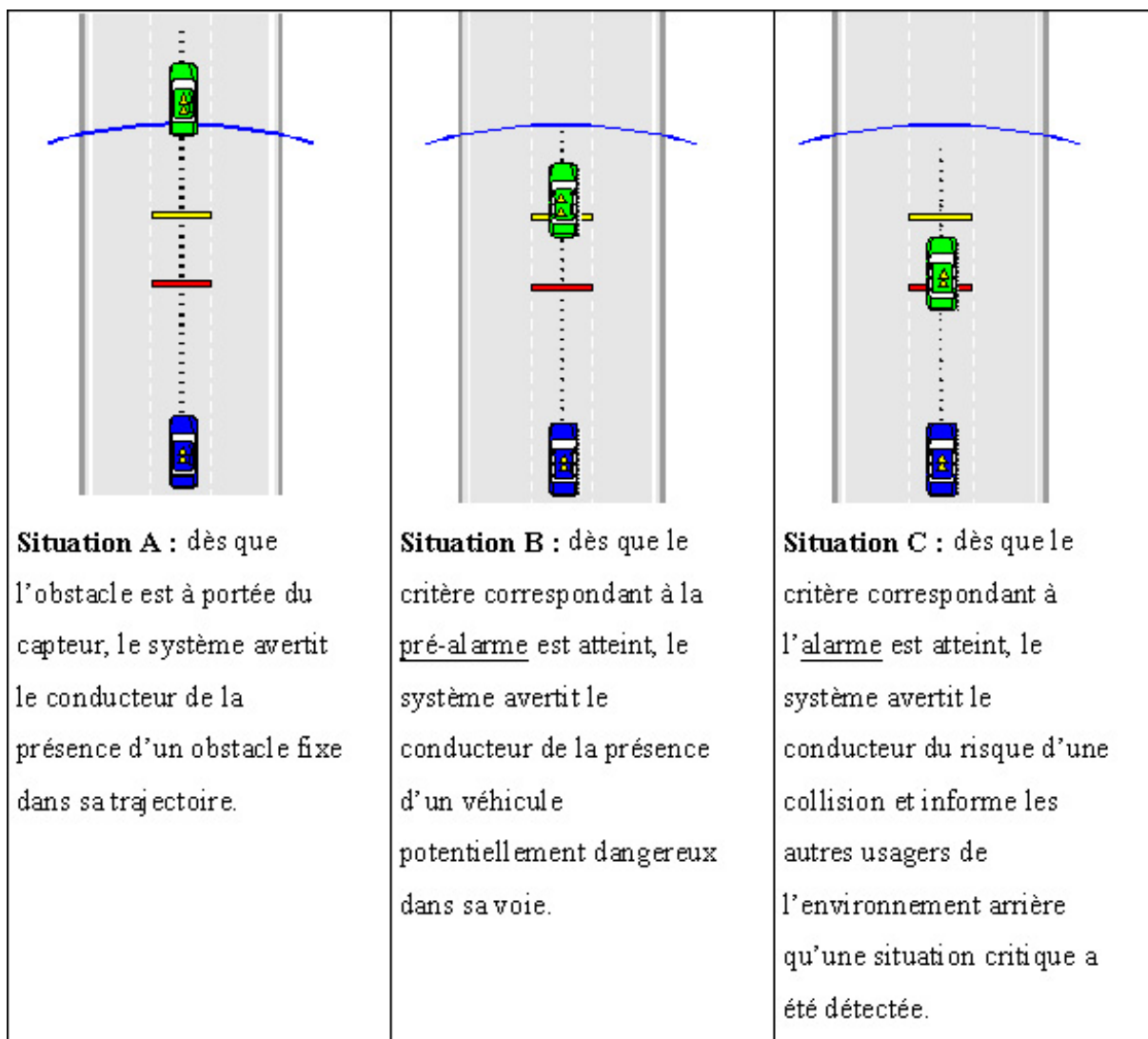


FIG. 4.3 – Suivi d'un véhicule « cible » roulant quasiment à la même vitesse

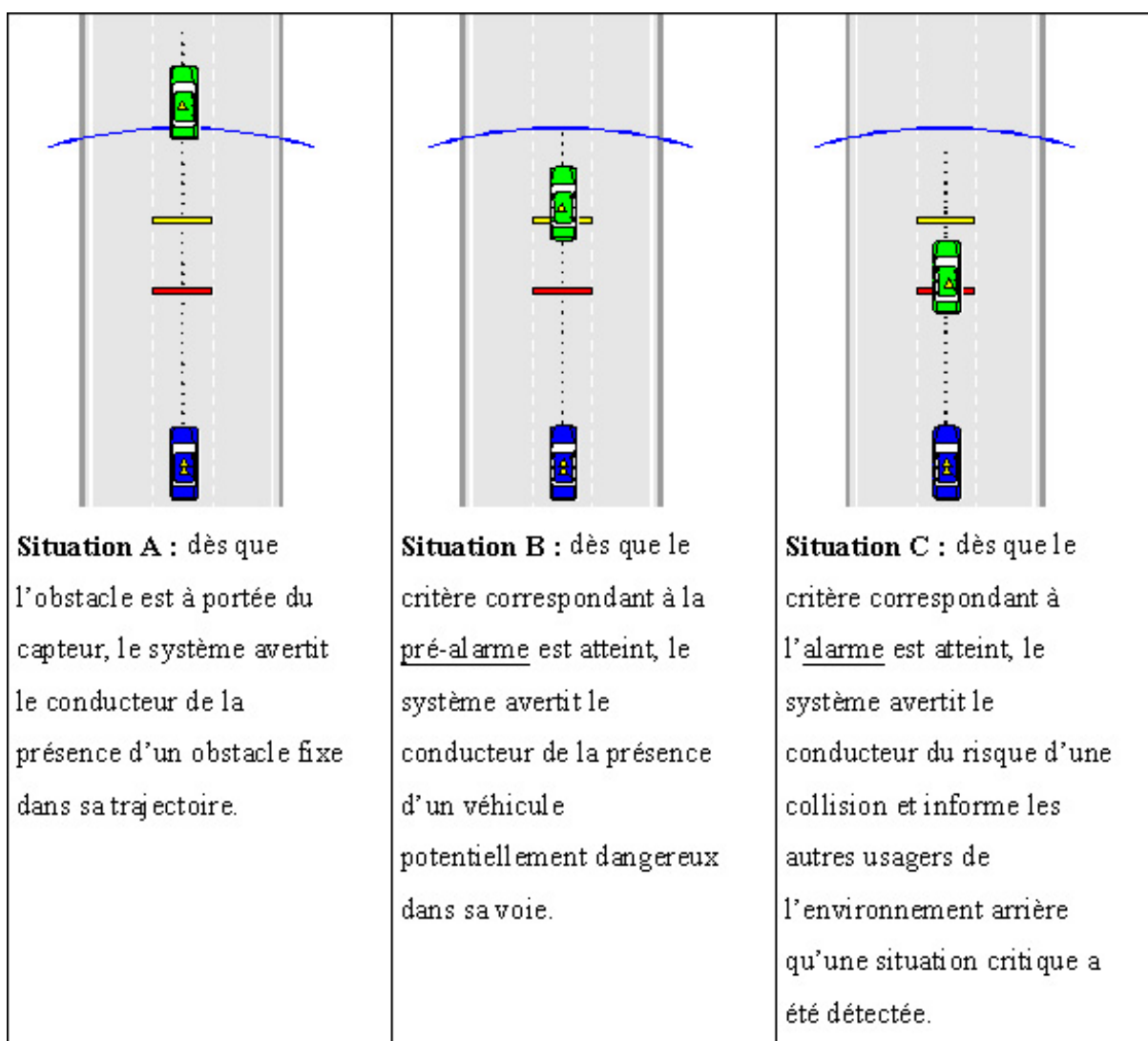


FIG. 4.4 – Arrivée sur un véhicule « cible » roulant moins vite

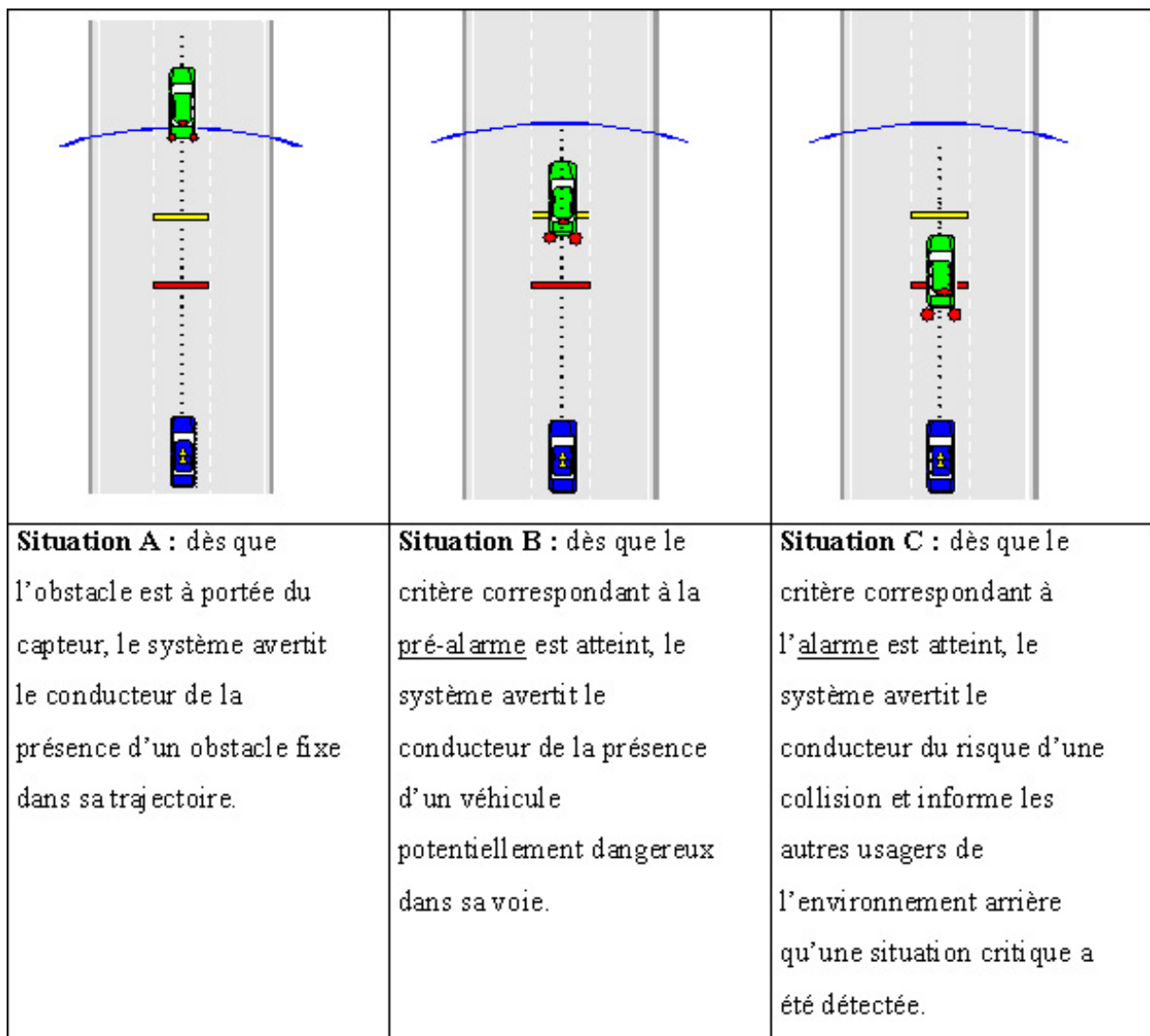


FIG. 4.5 – Arrivée sur un véhicule « cible » qui décélère

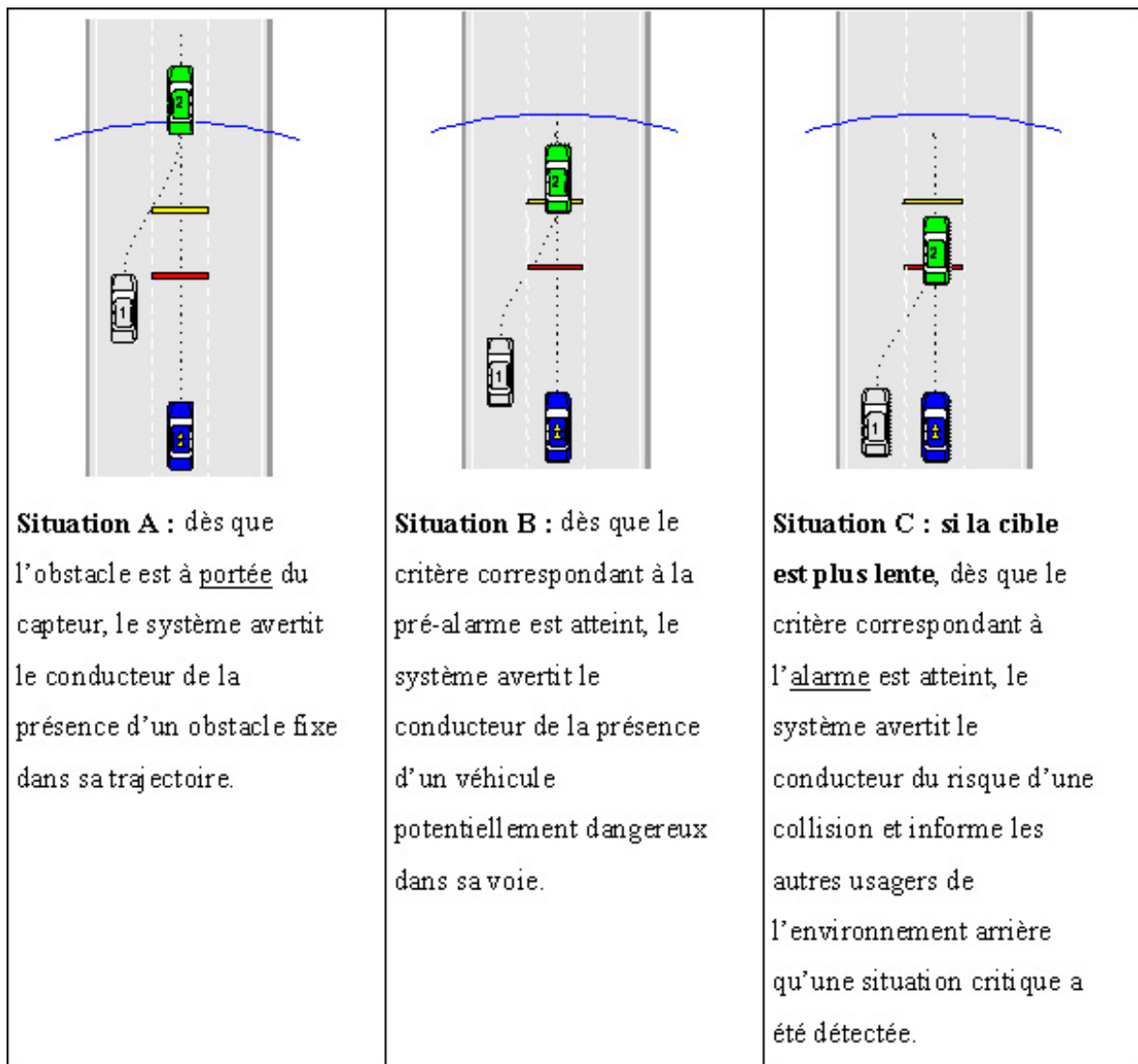


FIG. 4.6 – Insertion d'un véhicule « cible » dans la trajectoire (le véhicule grisé 1 symbolise la position initiale du véhicule « cible »)

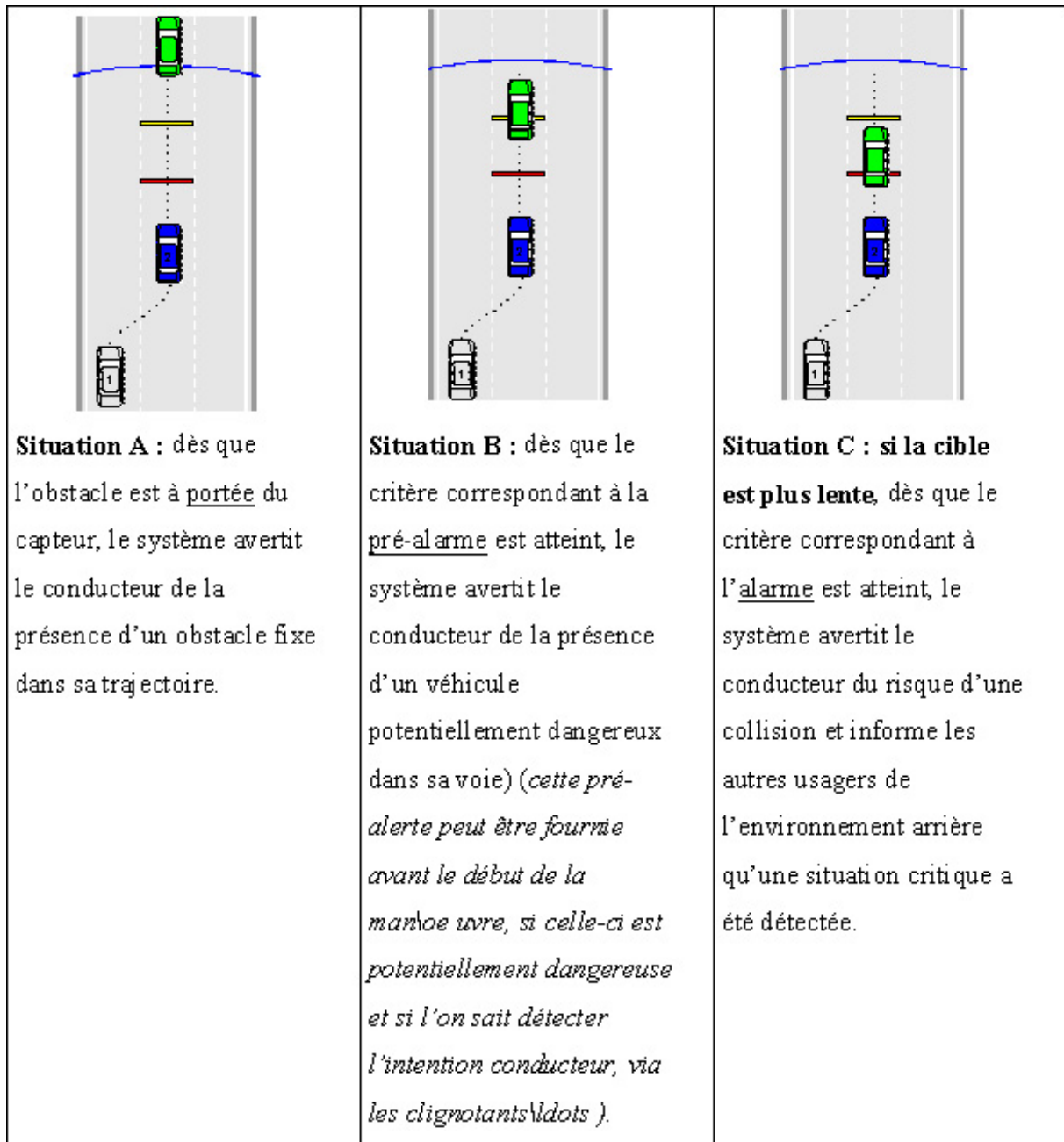


FIG. 4.7 – Changement de voie du véhicule équipé et arrivée sur un véhicule « cible » (le véhicule grisé 1 symbolise la position initiale du véhicule équipé)

choisir celles qui étaient les plus appropriées au Time Warning. L'objectif de ce système étant de faire lever le pied au conducteur afin qu'il ralentisse et se mette à une distance appropriée du véhicule le précédant, la « pédale d'accélérateur active » a retenu notre attention. Cette pédale est dite « active » car grâce à un système motorisé, il est possible de la faire durcir, vibrer, etc. La pédale n'est plus uniquement un moyen d'action du conducteur sur le véhicule, mais ajoute par ce biais, un moyen d'information du véhicule sur le conducteur. En ce sens, c'est une « interface active ». Les vibrations peuvent, par exemple, provoquer un lever de pied rapide de la pédale comme des études sur l'ABS l'ont montré (voir par exemple Flégel, Petit, Priez et Hébrard (1999)). Précisons que dans le cas de l'ABS, ce lever de pied n'était absolument pas souhaité, les vibrations découlant de contraintes techniques non souhaitables associées au système.

Il est également possible, en agissant sur la pédale de frein, de produire un freinage bref du véhicule. On parle alors de « jerk »(par exemple, aspiration simple de la pédale de frein, pendant 0,6 s, provoquant un pic de décélération à 0,24g).

Ces différentes possibilités ont été testées, selon différentes intensités. Afin de choisir les interfaces haptiques les mieux adaptées au Time Warning, des expérimentations ont été menées auprès de différents experts (en ergonomie, en solution IHM, en attentes client) et avaient pour but de recueillir leur avis. La première phase concernait des mesures en statique, hors contexte de conduite et était réalisée sur un banc d'essai qui se composait d'un siège et d'un pédalier. Puis, la seconde phase était menée sur route, en dynamique.

4.1.2.2 Expérimentation sur banc

4.1.2.2.1 Protocole

Lors des expérimentations sur banc, 30 experts (en ergonomie, en solution IHM, en attentes client) ont testé différentes configurations, notamment deux versions possibles associées à la pédale active. La première version est celle d'un brevet déposé par un particulier (version Landeretch). Elle fait intervenir un ressort qui amortit toutes les vibrations et qui permet uniquement de provoquer une force dans la pédale. Dans la seconde version développée par Renault, une barre rigide relie directement la pédale avec l'actionneur

électrique, toute action sur l'actionneur est ressentie dans la pédale. Sur banc, trois points ont donc été testés :

- Test à vide : comparaison des deux pédales : une pédale d'accélérateur ordinaire (la droite) versus une pédale équipée d'un moteur (pédale active) mais dont le moteur n'est pas actif (la gauche) ;
- Test en charge pour la version munie d'un ressort (version Landerecht) : il s'agit de réaliser un retour de force dans la pédale (déplacement angulaire de l'actionneur de -1 radian à 4 radians) ;
- Test en charge pour la version directe (version Renault) : elle permet de réaliser soit l'effet « coups de bélier » qui correspond à une impulsion de 8 N, soit un effet durcissement proportionnel, progressif (incrément de 0,2 N toutes les 10 ms, variation de 0 à 40 N). Elle permet également de produire des vibrations (Amplitude de 2 N à 10 N et fréquence de 5 ms à 50 ms).

4.1.2.2.2 Résultats

Les tests sur banc ont montré tous les atouts de la seconde version (version directe Renault) par rapport à la version équipée d'un ressort (Landerecht). Cette version directe permettait d'avoir un niveau de force moins important et d'obtenir des vibrations et des coups de bélier. De plus, ces expérimentations nous ont permis d'estimer les niveaux acceptables des interfaces haptiques, de pouvoir faire les tests de pilotage de l'actionneur et de vérifier que la partie mécanique était adaptée aux contraintes associées au pédalier.

Ainsi, les résultats issus des expérimentations sur banc ont montré que la configuration « pédale version directe » était meilleure que la pédale « équipée de ressort » et que les coups de béliers, les vibrations et le retour de force étaient trois interfaces envisageables pour le Time Warning.

Cependant, il fallait les tester en situation dynamique, notamment pour définir les caractéristiques qu'elles devraient avoir (amplitude, puissance, décélération, durée, etc.).

4.1.2.3 Expérimentation sur route

4.1.2.3.1 Protocole

Quatre types d'interfaces haptiques, dont les trois premiers correspondent à une interface via la pédale d'accélérateur, ont été testées sur route par 20 conducteurs et 20 conductrices, suivant différentes modalités :

- des vibrations induites dans la pédale d'accélérateur (Amplitude de 2 N à 10 N, fréquence de 0,2 s) ;
- un retour de force conduisant à un durcissement progressif de la pédale d'accélérateur (variation de 0 à 40 N) ;
- des coups de bélier ou secousses dans la pédale d'accélérateur (impulsions de 8 N) ;
- un jerk qui entraîne un bref freinage du véhicule (aspiration simple de la pédale de frein, pendant 0,6 s, provoquant un pic de décélération à 0,24g).

Ces interfaces étaient présentées dans le futur contexte d'utilisation, à savoir qu'elles se déclenchaient uniquement lorsque les conducteurs ne respectaient pas les distances de sécurité. Nous testions chacune de interfaces possibles, les unes après les autres et leur ordre était contrebalancé entre les conducteurs.

4.1.2.3.2 Résultats

Les conducteurs ont trouvé le jerk et les coups de bélier très intrusifs et ne comprenaient pas toujours leur signification. Ils étaient le plus souvent interprétés comme un problème lié au véhicule.

Les vibrations étaient bien comprises, mais jugées intrusives. Elles doivent donc être réservées aux situations les plus critiques. L'amplitude de 4 N est la mieux perçue et acceptée.

Concernant la force progressivement induite dans la pédale, les résultats sont rassemblés dans le tableau page 174.

Notons que le seuil de perception associé à la première fois où la pédale se durcit est plus élevé que les fois suivantes. En moyenne, la perception du retour de force dans la pédale la première fois était associée à un force de 28 N, alors que la majorité des conducteurs ressentaient par la suite le retour de force dès 16 et la totalité percevaient 20 N. Les conductrices jugeaient par la suite la pédale « trop dure » lorsqu'une force de 28 N était appliquée.

Force induite (en N)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Avis des conducteurs	Non perçu			Peu ressenti		Acceptable			Beaucoup trop dure	
Avis des conductrices	Non perçu			Peu ressenti		Acceptable	Trop dure	Beaucoup trop dure		

TAB. 4.1 – Ressentis sur le retour de force

4.1.2.4 Conclusion des deux expérimentations

Les résultats des deux expérimentations précédentes montrent que si les expérimentations sur banc permettent de faire un premier tri parmi les interfaces haptiques et d’obtenir un premier avis sur leur acceptabilité, les sensations ne sont pas représentatives de celles ressenties durant la conduite. Sur le banc d’essai, les seuls stimuli haptiques proviennent de la pédale, alors qu’en situation de conduite, de nombreux stimuli haptiques, associés aux vibrations du véhicule, sont présents. En outre, lors des expérimentations sur banc, la seule tâche du conducteur était de percevoir les stimuli envoyés dans la pédale et toute son attention était allouée à cette tâche, alors qu’en situation de conduite réelle, l’attention est partagée entre les différentes modalités perceptives (visuelles, auditives, kinesthésiques, etc.) et entre différentes tâches (conduite, détection de l’environnement, détection des interfaces, etc.). Ces différences entraînent notamment des seuils de perception plus élevés lors de la conduite réelle. Nous nous sommes donc concentrés sur les résultats issus de la conduite réelle, plus proche de la situation future d’utilisation, pour mettre au point les interfaces haptiques du Time Warning.

4.1.2.5 Description des interfaces envisageables pour le Time Warning

4.1.2.5.1 Interfaces haptiques

Concernant les interfaces haptiques, trois constats peuvent être faits. :

Tout d’abord, un retour de force de 24 N semble être le mieux adapté, il est perçu par tous les conducteurs, sans que la force induite soit jugée inacceptable. Il était important en effet de ne pas générer une force trop importante dans la pédale car il faut que le

conducteur puisse facilement la vaincre en cas de nécessité. Ainsi, lorsque la distance de sécurité n'est plus respectée, la pédale commence à se durcir, progressivement, jusqu'à atteindre la force maximale de 24 N. Cependant, les forces inférieures à 16 N n'étant pas perçus par l'ensemble des conducteurs, il faut générer une force assez importante (de 16 N à 20 N) au moment où le conducteur rentre dans une zone critique et l'augmenter progressivement jusqu'à 24 N voir 28 N, au fur et à mesure où le conducteur se rapproche du véhicule le précédent. Le durcissement allant de 0 à 12 N n'est pas suffisamment perceptible pour être utilisé comme alerte. La force minimale exercée sur l'axe de la pédale doit donc être de 16 N.

Ensuite, les vibrations doivent être réservées aux situations de type C car elles sont très intrusives. Elles produisent l'effet escompté, à savoir un levé de pied de l'accélérateur. L'amplitude retenue est de 4 N à une fréquence de 0,2 s.

Enfin, le jerk et les coups de béliers ne sont ni acceptés, ni compris par les conducteurs, ils n'ont donc pas été utilisés pour le Time Warning.

Les interfaces haptiques retenues semblent adaptées au Time Warning. Elles peuvent être progressives, elles agissent directement sur le moyen d'action (le pied du conducteur) et provoquent la réaction escompté à savoir un lever de pied. Cependant, elles nécessitent un minimum d'explications et même si le conducteur a tendance à lever le pied en réaction au stimulus haptique, il faut s'assurer qu'il sait pourquoi. Or, sans explications préalables, le conducteur n'associe pas toujours ce qu'il ressent dans le pied via la pédale à un non respect des distances de sécurité. D'autres interfaces ont donc été envisagées, au moins dans un premier temps, pour expliciter les interfaces haptiques. Nous avons donc défini les icônes visuelles qui pourraient accompagner ces interfaces haptiques.

4.1.2.5.2 Icônes visuelles possibles





Comme nous l'avons vu précédemment, trois niveaux d'alertes sont possibles :

- Niveau vert : un véhicule est détecté par le radar mais est à une distance correcte (temps de suivi > 2 s) ;
- Niveau orange : un véhicule est détecté par le radar, la distance de sécurité n'est

pas respectée et le temps de suivi est compris entre 1 et 2 s ;

- Niveau rouge : un véhicule est détecté par le radar, la distance de sécurité n'est pas respectée et le temps de suivi est compris entre 0 et 1 s.

Nous avons donc associé une icône visuelle à chacun de ces niveaux. Cependant, il nous a semblé pertinent de différencier deux niveaux d'alarmes au niveau rouge, en fonction de la criticité de la situation. Un temps de suivi inférieur à 0,5s est réellement inacceptable car le conducteur n'aurait absolument pas le temps de réagir en cas de freinage soudain du véhicule le précédent. Une interface visuelle supplémentaire a donc été prévue pour ces situations.

Niveau vert	Niveau orange	Niveau rouge 1 (Temp s Suivi < 1s)	Niveau rouge 2 (Temp s Suivi < 0,5s)
TEMPS DE SUIVI	TEMPS DE SUIVI		
			

4.1.2.5.3 Interface sonore possible

Une interface sonore peut être associée au niveau rouge : un bip sonore retentit dès que et tant que le temps de suivi est inférieur à 1 seconde.

4.1.2.5.4 Résumé des interfaces envisageables pour le système Time Warning

Ainsi, le système Time Warning mis au point module la force de rappel exercée par la pédale d'accélérateur lorsque le conducteur roule à moins de 2 secondes du véhicule qui le précède. Cette force a été réglée pour pouvoir être facilement vaincue par le conducteur qui peut à tout moment outrepasser le système si une situation le nécessite, comme par exemple la réalisation d'un dépassement. La force exercée par la pédale varie en fonction du temps de suivi. Elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum lorsque le

temps de suivi est inférieur à 1 seconde. A ce niveau d'alerte, des vibrations sont également envoyées dans la pédale.

Enfin, des signaux visuels évolutifs ou un bip sonore (interface sonore réservée au niveau rouge) peuvent être également émis pour compléter le message d'alerte du conducteur lorsque la distance entre les véhicules devient trop faible. Le schéma 4.8 récapitule les différentes interfaces possibles pour le Time Warning. Notons qu'elles ont toutes été conçues dans le but d'être évaluées et comparées entre elles. Nous ne préconisons pas a priori l'utilisation des trois modalités sensorielles simultanément. Les interfaces du Time Warning peuvent haptiques, visuelles ou auditives et ces modalités peuvent être soit dissociées soit cumulées.

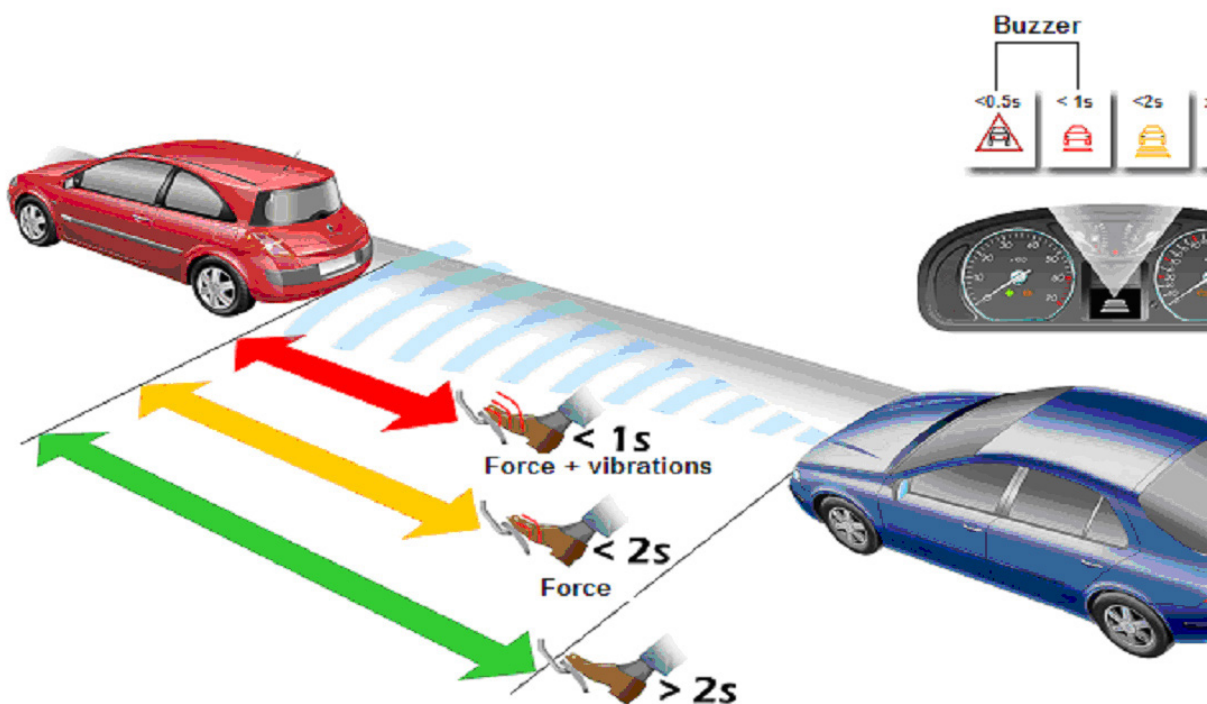


FIG. 4.8 – Interfaces possibles pour le Time Warning

Suite à cette phase de conception des interfaces possibles du système Time Warning, une phase d'évaluation était nécessaire. Nous avons donc mis au point une campagne d'évaluation, sur route ouverte, afin d'évaluer le fonctionnement du Time Warning ainsi que son acceptation auprès de 81 conducteurs.

4.1.3 Évaluation du Time Warning

4.1.3.1 Description de l'expérimentation réalisée

L'objectif de cette phase était de mesurer l'apport de ce système et plus particulièrement d'évaluer différentes solutions d'interfaces innovantes (interfaces haptiques, icônes visuelles en zone A1⁵) par rapport aux solutions actuelles (icônes visuelles en zone A2 associées à un bip sonore) et de déterminer si différentes modalités sensorielles devaient être combinées et le cas échéant, lesquelles et sous quelles conditions.

4.1.3.1.1 Population d'étude

81 conducteurs, tous volontaires, salariés Renault, hommes (66,6%) et femmes (33,3%), ayant une voiture appartenant au moins au segment M1 (Gamme Mégane), d'âges et de Catégories Socio-Professionnelles différents, ont participé à cette étude. L'âge des sujets était compris entre 20 et 58 ans (l'âge moyen est de 38,5 ans).

4.1.3.1.2 Contexte expérimental

L'expérimentation a eu lieu sur route ouverte et a compris 1 heure 30 minutes de conduite sur départementales, nationales et autoroute. Les sujets ont eu pour consigne de conduire comme ils en avaient l'habitude. Certains ont réalisé le trajet sans aucun système d'aide, d'autres ont évalué le Time Warning, associés à un groupe d'interfaces prédéfinies. Différentes interfaces étaient possibles, mais chaque sujet n'a évalué qu'une version possible du système. Par ailleurs, il y avait trois passations par jour (8h30, 10h45 et 14h00), afin d'avoir des conditions de trafic différentes. Les différents groupes sont présentés dans le tableau 4.2. Pour chacun des groupes, trois conducteurs, dont une femme, passaient à chacun des horaires.

Le conducteur roulait sans système d'assistance durant 30 minutes puis nous lui expliquions le fonctionnement du Time Warning et de ses interfaces. Ce dernier était alors activé, sur la fin du trajet qui comprenait des départementales, de l'autoroute et une portion de la nationale 118. Sur cette dernière portion, une seconde version du Time

⁵Définition des zones A1 et A2 : voir schémas page 5, chapitre 2 .

Groupe	Système	Interfaces	Conditions	Sujets
Groupe 1	Aucun	Aucune	Contrôle	9
Groupe 2	Time Warning	A2 + Bip sonore	Interfaces classiques	9
Groupe 3	Time Warning	A1 + Bip sonore	Interfaces innovantes	9
Groupe 4	Time Warning	Haptique seul	Interfaces innovantes	9
Groupe 5	Time Warning	A2 + Haptique	Interfaces innovantes	9
Groupe 6	Time Warning	A1 + Haptique	Interfaces innovantes	9
Groupe 7	Time Warning	Haptique + Bip sonore	Interfaces innovantes	9
Groupe 8	Time Warning	A2 + Haptique + Bip sonore	Interfaces innovantes	9
Groupe 9	Time Warning	A1 + Haptique + Bip sonore	Interfaces innovantes	9

TAB. 4.2 – Constitution des groupes

Warning était évaluée. Le système Time Warning était toujours actif, mais une fonction supplémentaire était ajoutée. Lorsque le conducteur suivait de trop près le véhicule le précédent (Temps de suivi < 2 s), la fonction « ASD » consistait à augmenter le frein moteur dès que le conducteur levait le pied de l'accélérateur. Cela permettait notamment de ralentir le véhicule entre le moment où le conducteur relâchait l'accélérateur et celui où il freinait. Cette fonction ASD n'avait pas d'interface spécifique, outre l'augmentation du frein moteur

A la fin de la conduite, un questionnaire concernant le Time Warning devait être rempli par les conducteurs et un « débriefing » avait lieu.

4.1.3.1.3 Paramètres enregistrés

- Mesures physiologiques (fréquence enregistrement à 50 hertz)
 - Résistance cutanée
- Vidéo
 - Scène avant
 - Visage conducteur
 - Pieds du conducteur
 - Scène arrière
- Microphone pour enregistrer les verbalisations du conducteur
- Mesures physiques associées au véhicule :
 - Course de la pédale d'accélérateur
 - Pression sur la pédale de frein

- Vitesse du véhicule
- Distance relative par rapport au véhicule précédent
- Vitesse relative par rapport au véhicule précédent

4.1.3.1.4 Indicateurs utilisés pour comparer les différents groupes expérimentaux

- Indicateurs issus de l'analyse vidéo et des entretiens :
 - Adéquation de la « réponse comportementale » du sujet à la situation de conduite
 - Réponses à l'entretien- bilan réalisé après la conduite
- Indicateurs issus des données physiologiques :
 - Nombre de réponses phasiques électrodermales
 - Temps entre la présentation des interfaces du système et l'apparition de la réponse en résistance cutanée (délai de perception)
 - Durée de la perturbation ohmique de la résistance (DPO) associée à la présentation des interfaces du système (qui caractérise la période pendant laquelle le sujet est soumis au stimulus)
- Indicateurs issus des données « véhicule »
 - Nombre de fois où le système se déclenche
 - Temps de suivi⁶ moyen
 - Répartition du temps passé au dessus et en dessous du seuil des 2 secondes
 - Durée moyenne des intervalles durant lesquels le temps de suivi est inférieur à 2 secondes

4.1.3.2 Résultats

4.1.3.2.1 Répartition des conducteurs entre les groupes

La répartition des conducteurs au sein des neuf groupes a été faite au hasard et il n'y a pas de différence statistique significative (t de Student) entre ces groupes du point de vue de l'âge et du nombre d'années de permis des conducteurs ($p > 0,25$).

⁶Le temps de suivi (Time gap) correspond à la distance entre les deux véhicules (D) divisée par la vitesse du véhicule équipé (V) : $\text{Time Gap} = D/V$.

Groupes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Moy. G ⁷
Age moyen	38,57	34,89	37,67	35,44	40,00	37,10	39,40	41,25	40,25	38,45
Années de permis	19,86	15,78	18,67	15,33	19,89	18,50	19,90	22,92	20,33	19,18

4.1.3.2.2 Résultats issus des mesures subjectives

4.1.3.2.2.1 Réponses au questionnaire sur le Time Warning

Nous avons reproduit dans les pages suivantes les questions qui servaient de base à l'entretien-bilan réalisé à la fin de la phase de conduite. Les réponses moyennes des conducteurs sont indiquées entre parenthèses. La significativité des résultats présentés ci-dessous a été évaluée grâce au test du χ^2 . L'astérisque (*) indique que les résultats sont statistiquement significatifs à $p < 0,01$.

• **Quel est selon vous l'objectif de ce système ?**

Réponses les plus fréquentes :

- Aider à conserver les distances de sécurité **(80% des réponses)**
- Prendre conscience du risque **(20%)**
- Réapprendre à conduire **(20%)**
- Prévention des accidents, des carambolages **(20%)**

• **Trouvez vous ce système¹ :**

Pas du tout utile (0%)	Peu utile (1,1%)	Moyennement utile (5,7%)	Utile (37,9%)	Très utile (55,2%)*
------------------------	------------------	--------------------------	---------------	----------------------------

• **Pourquoi ?**

Points positifs :

- Le système donne un critère objectif, il permet de se rendre compte **(55% des réponses)**
- " on ne se rend pas compte " **(33%)**
- " on colle trop " **(25%)**
- Le Time Warning permet de prendre conscience du danger, c'est un garde-fou, c'est sécurisant **(22%)**
- "ça nous évite de rentrer dans le véhicule de devant" **(20%)**
- Il apporte de la vigilance, il augmente l'attention **(8%)**

Points négatifs :

- Il pose des problèmes quand le trafic est dense **(7% des réponses)**

• **Avez-vous trouvé que le système vous a averti de façon :**

Pas du tout adaptée (0%)	Peu adaptée (6,3%)	Moyennement adaptée (10,1%)	Plutôt adaptée (50,6%)*	Tout à fait adaptée (32,9%)
--------------------------	--------------------	-----------------------------	--------------------------------	-----------------------------

- **Pourquoi ?**

Points positifs :

- Bonnes interfaces **(49% des réponses totales)**
 - Bonnes interfaces haptiques **(32% des réponses totales, 63% des réponses "Bonnes interfaces")**
 - La force dans la pédale est bien jugée par **34%** des conducteurs (56% des réponses "Bonnes interfaces", 87% des réponses "Bonnes interfaces haptiques"), "c'est discret et on le sent quand même", "Il y a un côté réactif, mais il ne s'immisce pas trop"
 - Les vibrations dans la pédale sont bien jugées par **5%** des conducteurs (et 8% des réponses "Bonnes interfaces" et 13% des réponses "Bonnes interfaces haptiques")
 - Bonnes interfaces visuelles **(12% des réponses totales, 20% des réponses "Bonnes interfaces")**
 - Bonnes interfaces sonores **(4% des réponses totales, 6% des réponses "Bonnes interfaces")**
- Le système se déclenche au bon moment **(36% des réponses totales)**

Points négatifs :

- Cela pose problème quand un véhicule s'insère devant notre véhicule **(21% des réponses)**
- Le sonore est intrusif, voire pénible **(10%)**
- Le système se déclenche trop tôt, "à 2 secondes, j'ai encore le temps !" **(8%)**

- **Le système vous a-t-il gêné durant votre conduite :**

Pas du tout gêné (38,8%)*	Un peu gêné (40%)*	Moyennement gêné (13,8%)	Plutôt gêné (6,3%)	Énormément gêné (1,3%)
----------------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------	------------------------

- **Dans quelles situations :**

- Lorsqu'une voiture s'insère **(40% des réponses)**
- Lorsque le trafic est dense **(12%)**
- " Lorsqu'on veut doubler, déboîter ", " la pédale gêne mon action " **(12%)**

- " Au début "(11%)
- Dans les ronds-points (9%)
- A faible vitesse (ex : en ville) (5%)

Reprenons différentes situations de conduite que vous avez rencontrées. Pour chacune d'entre elles, comment avez vous jugé le système :

- **Durant votre intégration dans un flot de véhicule :**

Très mauvais (3,8%)	Passable (12,7%)	Moyen (15,2%)	Bon (50,6%)*	Très bon (17,7%)
------------------------	---------------------	------------------	-------------------------	---------------------

- **Durant un suivi de véhicule (dans la même voie) :**

Très mauvais (1,3%)	Passable (3,8%)	Moyen (8,8%)	Bon (53,8%)*	Très bon (32,5%)
------------------------	--------------------	-----------------	-------------------------	---------------------

- **Durant une manœuvre de dépassement (vous avez doublé un autre véhicule) :**

Très mauvais (0%)	Passable (5%)	Moyen (22,5%)	Bon (52,5%)*	Très bon (20%)
----------------------	------------------	------------------	-------------------------	-------------------

- **Durant un démarrage derrière un autre véhicule (ex : feu rouge, stop, bouchon...) :**

Très mauvais (1,4%)	Passable (19,4%)	Moyen (15,3%)	Bon (38,9%)*	Très bon (25%)
------------------------	---------------------	------------------	-------------------------	-------------------

- **Concernant les interfaces du système, vous les avez trouvées :**

Pas du tout explicites (0%)	Peu explicites (1,3%)	Moyennement explicites (2,5%)	Plutôt explicites (46,3%)*	Tout à fait explicites (50%)*
-----------------------------	--------------------------	-------------------------------	---------------------------------------	--

- **Détaillons les différentes interfaces que vous avez rencontrées (visuelles, sonores et pédales selon votre condition de passation). Les avez-vous trouvées :**

- **explicites ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (0%) en A2 (0%) en A1 (0%)	Visuel (3,3%) en A2 (3,3%) en A1 (3,2%)	Visuel (13,1%) en A2 (10%) en A1 (16,1%)	Visuel (45,9%)* en A2 (43,3%)* en A1 (48,4%)*	Visuel (37,7%) en A2 (43,3%)* en A1 (32,3%)
Sonore (0%)	Sonore (5,8%)	Sonore (19,2%)	Sonore (40,4%)*	Sonore (34,6%)
Haptique (1,7%)	Haptique (3,4%)	Haptique (6,8%)	Haptique (32,2%)	Haptique (55,9%)*

- **adaptées ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (1,6%) en A2 (0%) en A1 (3,2%)	Visuel (4,9%) en A2 (6,7) en A1 (3,2%)	Visuel (14,8%) en A2 (20%) en A1 (9,7%)	Visuel (39,3%)* en A2 (33,3%) en A1 (45,2%)*	Visuel (39,3%)* en A2 (40%) en A1 (38,7%)
Sonore (0%)	Sonore (13,5%)	Sonore (13,5%)	Sonore (42,3%)*	Sonore (30,8%)
Haptique (1,7%)	Haptique (1,7%)	Haptique (8,5%)	Haptique (30,5%)	Haptique (57,6%)*

- **facilement perçues ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (3,3%) en A2 (7,4%) en A1 (0%)	Visuel (3,3%) en A2 (0%) en A1 (6,5%)	Visuel (19,7%) en A2 (29,6%) en A1 (12,9%)	Visuel (37,7%)* en A2 (40,7%)* en A1 (38,7%)	Visuel (36,1%) en A2 (22,2%) en A1 (41,9%)*
Sonore (0%)	Sonore (1,9%)	Sonore (5,8%)	Sonore (55,8%)*	Sonore (36,5%)
Haptique (0%)	Haptique (1,7%)	Haptique (6,8%)	Haptique (23,7%)	Haptique (67,8%)*

Scores moyens associés à l'appréciation des interfaces
(1 = Très mauvais à 5 = Très bon)

Interfaces	Explicites ?	Adaptées ?	Facilement perçues ?
Visuelles	4,2	4,1	4
en zone A2	4,3	4,1	3,7
en zone A1	4,1	4,1	4,2
Sonores	4	3,9	4,3
Haptiques	4,4	4,4	4,6

- **Remarques :**

- L'écran A2 est mal placé, surtout pour le niveau rouge (selon **71%** des réponses¹)
- La force dans la pédale et les vibrations sont dans l'ensemble bien acceptées, mais elles surprennent le conducteur au début, elles nécessitent un apprentissage (surtout dans la condition haptique seul) " Une fois qu'on a compris, c'est bon " (selon **35%** des réponses¹⁷)
- Le sonore est à revoir (**35%** des réponses¹⁷)
- Le texte " Temps de suivi " est inutile et " incompréhensible " (**18%**¹⁷)
- La pédale devrait avoir une attaque plus franche (**10%**¹⁷)
- Les couleurs sont à revoir (vert jugé noir et pas assez de différence entre l'orange et le rouge) (**5%**¹⁷)

- **Quelles modifications souhaiteriez vous apporter à ces interfaces ?**

- Mettre le visuel en zone A1 (**76%** des réponses¹⁷)
- Modifier, voire supprimer le sonore (**23%**¹⁷)
- Augmenter l'attaque de la pédale (**15%**¹⁷)
- Adapter le système aux situations de trafic dense, aux bouchons et aux véhicules qui s'insèrent (**14%**)
- Supprimer le texte " Temps de suivi " (**13%**¹⁷)

- **Durant votre expérience passée de conduite, avez-vous déjà été confronté à une situation où le système "Time warning" vous aurait été utile ?**

Non (22,1%)	Oui (77,9%)*
-------------	--------------

- **Si oui, laquelle ?**

- Freinage d'urgence, accident devant **(37% des réponses)**
- Surtout sur autoroute **(35%)**
- " Je roule trop près " **(33%)**
- Lors d'une diminution de mon attention, de ma vigilance (ex : long trajet) **(22%)**
- Conditions climatiques mauvaises (route mouillée, brouillard...) **(10%)**
- Changement de rythme, accordéon **(9%)**

⇒ **Le système peut aider**

- **Nous pouvons installer ce système sur votre véhicule personnel. Êtes-vous prêts à l'essayer pendant un mois ?**

Non (3,7%)	Oui (96,3%)*
------------	--------------

- **Pensez-vous que c'est un système indispensable en série ?**

Pas du tout (5,9%)	Un peu (3,5%)	Moyennement (11,8%)	Plutôt (56,5%)*	Absolument (22,4%)
-----------------------	------------------	------------------------	----------------------------	-----------------------

- **Avez vous préféré le Time Warning avec ou sans décélération du véhicule ?**

- **20 %** des conducteurs n'ont pas perçu de différence
- **64,9%** des conducteurs ayant perçu une différence préfère avec l'ASD

4.1.3.2.2 Conclusion issue des mesures subjectives

Les données issues des entretiens-bilan montrent une bonne acceptabilité et utilité du système Time Warning. Les conducteurs ont compris son objectif, le jugent utile (37,9% des réponses totales), voire très utile (55,2% des réponses totales) car il permet de se rendre compte des distances de sécurité (55% des réponses totales), qu'ils « collent trop » (25% des réponses totales). Plus de 3 conducteurs sur 4 estiment qu'un tel système aurait pu les aider par le passé, lors, par exemple, d'un freinage d'urgence associé à un obstacle sur la voie (37% des réponses affirmatives), ou sur autoroute (35% des réponses affirmatives).

Un conducteur sur 2 juge que le système l'a averti de façon plutôt adaptée et un conducteur sur trois de façon tout à fait adaptée. Le système est jugé peu gênant par 40% des conducteurs et pas du tout gênant par 38,8%. Cependant, son fonctionnement est à revoir dans les situations où un véhicule s'insère devant le véhicule équipé.

Concernant les interfaces visuelles, sonores et haptiques évaluées, elles sont jugées explicites, adaptées et facilement perçues. La pédale active obtient de meilleures appréciations que les deux autres modalités sensorielles (elle est jugée significativement « très bonne » alors que les interfaces sonores et visuelles sont significativement jugées « bonnes ».). Concernant l'emplacement de l'affichage visuel, la zone A1 est plus facilement perçue que la zone A2 et trois conducteurs sur quatre qui ont eu une interface visuelle sur le tableau de bord (zone A2) précisaient qu'ils préféreraient l'avoir en zone « bas de pare-brise » (zone A1). Concernant le mode ASD⁸, parmi les 80% de conducteurs qui ont perçu l'augmentation du frein moteur qu'il générait, 64,9% préféraient ce mode de fonctionnement.

Enfin, quasiment tous les conducteurs (96,3%) étaient prêts à avoir ce système sur leur véhicule personnel pendant un mois et plus de trois conducteurs sur quatre pensaient que ce système était indispensable en série (56,5% « plutôt indispensable » et 22,4% « absolument indispensable »). Selon les mesures subjectives utilisées pour cette évaluation, le système Time Warning a été jugé utile, utilisable, efficace, « non-dangereux » (sauf lorsque les icônes visuelles sont présentées en A2) et satisfaisant, bien que quelques améliorations

⁸Le mode ASD produit augmentation du frein moteur lorsque la distance de sécurité n'est pas respectée et que le conducteur relève le pied de l'accélérateur.

puissent être encore apportées.

4.1.3.2.3 Résultats issus des mesures physiologiques

Rappelons que la résistance électrodermale, de nature électrique, est le reflet périphérique de l'activité du système nerveux autonome. En situation nominale, la résistance cutanée fluctue légèrement autour d'une ligne de base dont la valeur moyenne renseigne sur le niveau global d'éveil d'un individu. Dès qu'un stimulus extérieur est compris par le système nerveux autonome comme sortant de la routine habituelle, cela se traduit, par une chute brutale de la résistance cutanée, facilement repérable et quantifiable. Ce sont deux paramètres de cette chute de résistance qui nous intéressent particulièrement :

- son délai d'apparition par rapport au stimulus qui nous renseigne sur le délai de perception
- sa durée qui nous renseigne sur le temps nécessaire au traitement de l'information, en d'autres termes la charge attentionnelle associée au stimulus.

En enregistrant la résistance électrodermale, on peut donc quantifier le temps de perception d'une alerte par un conducteur et la charge attentionnelle qui lui est nécessaire pour traiter cette alerte. Le traitement et l'analyse de la réponse électrodermale nécessitant une expertise en physiologie, ils ont été réalisés en collaboration avec un expert en physiologie (C. Petit). Le traitement des résultats a concerné 50 conducteurs répartis en 5 groupes (cf. tableau 4.3 en page 189). La significativité des résultats présentés ci-dessous a été statistiquement évaluée grâce au t de Student.

groupe H	pédale haptique seule
groupe H+V	pédale haptique plus alerte visuelle
groupe H+S	pédale haptique plus alerte sonore (bip sonore)
groupe H+V+S	pédale haptique plus alertes visuelle et sonore
groupe V+S	alertes visuelle et sonore

TAB. 4.3 – Définition des groupes

4.1.3.2.3.1 Taux de réponses par modalité

On a vu précédemment que le niveau de base de la réponse électrodermale fluctue sans arrêt autour d'une valeur moyenne qui reflète de niveau d'éveil du conducteur. Quand la

variation est positive, le niveau d'activation baisse, quand elle est négative, le niveau d'activation augmente. Ces variations sont continues et témoignent de l'activité du conducteur. Quand une chute brutale apparaît sur cette ligne de base, il y a rupture : c'est une réponse que l'on appelle phasique et qui témoigne d'une charge attentionnelle particulière attribuée à un évènement précis, qui sort de la conduite habituelle.

Le taux de réponses est donc une première valeur informative de la charge attentionnelle associée à la modalité particulière de l'interface (visuelle, sonore ou haptique). Un nombre de réponses élevé par rapport au nombre d'alertes témoigne d'une charge attentionnelle générée par ces alertes. On comptabilise environ 300 alertes par groupe, c'est-à-dire une trentaine en moyenne par sujet sur un parcours d'une heure. Cette première donnée montre la difficulté des conducteurs à estimer et respecter par eux-mêmes le temps de suivi de 2 secondes et par conséquent l'intérêt du système.

Toutes les figures présentées ci-dessous utilisent la même codification pour décrire le type d'interface présentée au conducteur :

- H = haptique (durcissement de la pédale d'accélérateur)
- H + S = haptique + sonore (bip sonore)
- H + V = haptique + visuel
- V + S = visuel + sonore
- H + V + S = haptique + visuel + sonore

de l'alerte associée au système Time Warning.

La figure 4.9 montre que la présentation de l'alerte via une interface haptique seule induit une charge attentionnelle moindre (27% de réponses phasiques en résistance cutanée) comparativement aux autres interfaces. Inversement, une interface visuelle, qu'elle soit associée à une interface sonore ou haptique, induit une charge attentionnelle plus importante, puisqu'elle peut entraîner jusqu'à 39 % de réponses phasiques en résistance cutanée. Ce premier résultat reflète la bonne intégration de l'interface haptique dans la conduite.

4.1.3.2.3.2 Délai de perception de l'interface selon les modalités

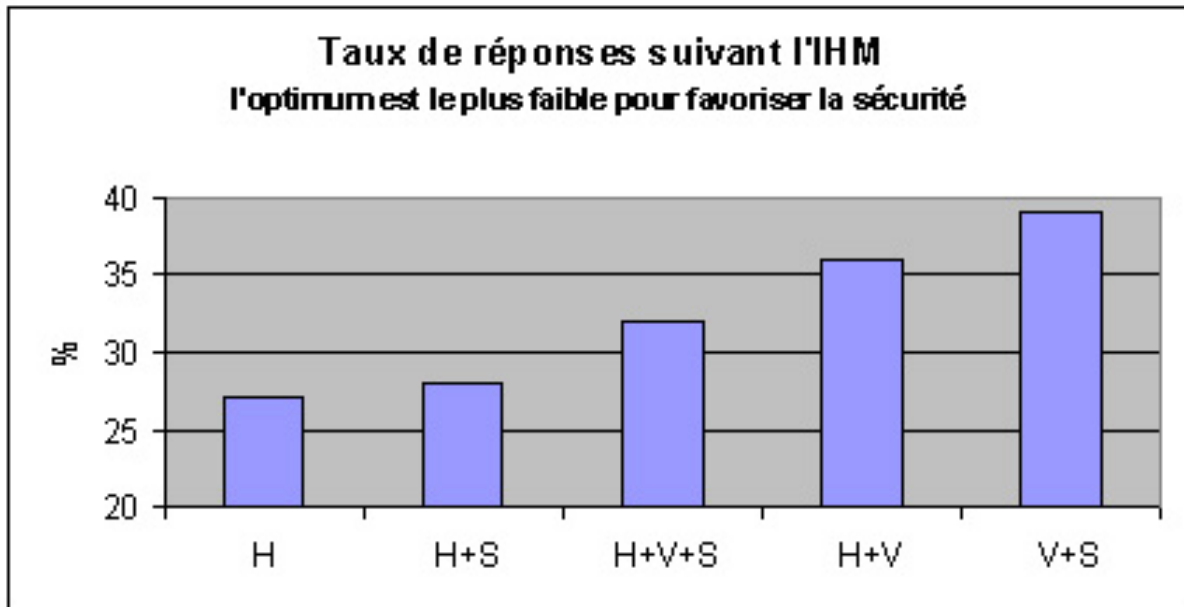


FIG. 4.9 – Taux de réponses phasiques électrodermales suivant la modalité

On a vu que la réponse électrodermale permettait d'accéder à un paramètre impossible à quantifier par d'autres méthodes d'étude du comportement humain : le délai de perception d'un évènement.

Ce paramètre n'est repérable que lorsqu'il y a une réponse phasique ; or on vient de voir que le taux de réponses phasiques était inférieur dans tous les cas à 40%. Néanmoins, pour chaque réponse détectée, on a calculé ce délai.

Comme on connaît le moment exact de la présentation de l'alerte au conducteur via l'une ou l'autre des interfaces, il est facile de calculer le délai entre cet instant et l'instant d'apparition de la chute brutale de la résistance cutanée.

Quel que soit le type d'interfaces proposé, on voit que le délai moyen de perception par le système nerveux central est inférieur à 1,5 sec. Le délai moyen le plus court est celui obtenu lorsque l'alerte est présentée sous forme de l'association haptique et sonore.

La seule valeur se différenciant significativement des autres ($p < 0,05$) est le délai de perception de l'association sonore et visuelle. C'est le délai le plus long.

L'utilisation de la pédale d'accélérateur active comme alerte permet donc de raccourcir le délai de perception par rapport aux alertes sonores et visuelles.

4.1.3.2.3.3 Charge attentionnelle suivant l'interface présentée

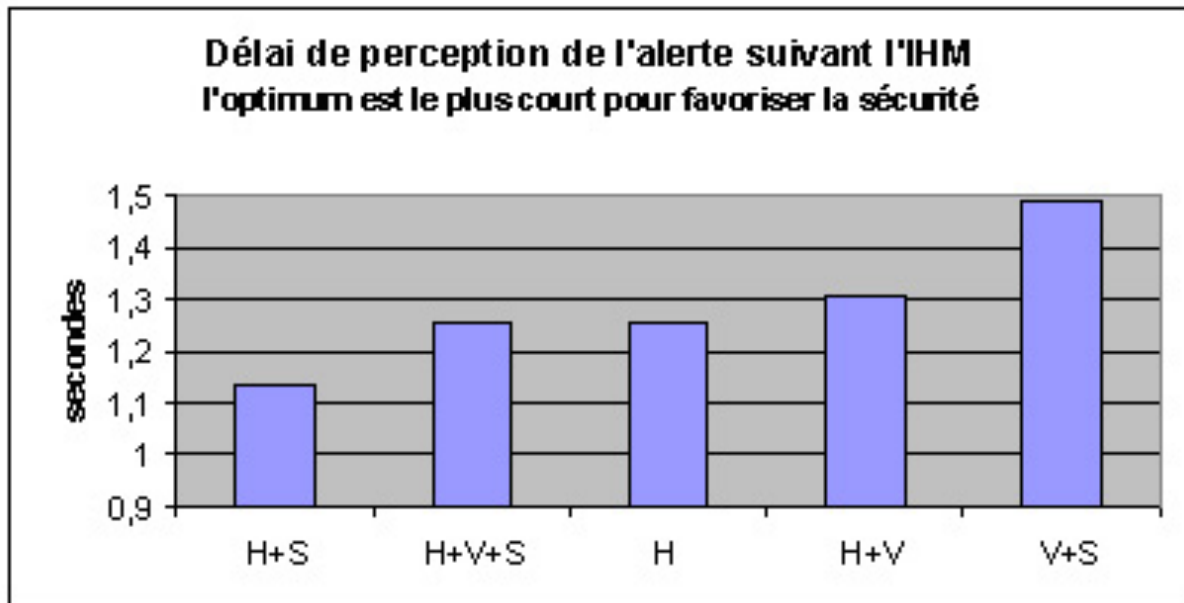


FIG. 4.10 – Délai de la réponse phasique électrodermale suivant la modalité de l'alerte associée au système Time Warning

La charge attentionnelle associée à la compréhension de l'alerte proposée est un paramètre important à connaître car il n'est pas envisageable qu'un conducteur apporte une part attentionnelle plus importante à une alerte sentée lui apporter une aide qu'à sa tâche de conduite.

Pour chaque modalité, on a donc calculé le temps pendant lequel le conducteur était soumis à l'alerte associée au système d'aide : c'est la DPO (durée de la perturbation ohmique).

Toutes les valeurs moyennes de DPO sont inférieures à 3 secondes. Pour aider à la compréhension de cet indicateur, c'est la durée habituellement enregistrée lors de prise d'information du conducteur dans les rétroviseurs ou sur le tableau de bord quand il y recherche une information particulière (vérifier qu'il n'y a pas de véhicule avant de doubler, vérifier si la vitesse est conforme à la situation).

Les valeurs obtenues montrent une tendance favorable une fois encore à l'information transmise via la pédale haptique, seule ou associée à une alerte sonore. La durée de traitement de l'information transmise via la pédale haptique est la plus courte. En revanche, dès que l'interface visuelle est associée à ces deux modalités, la durée de traitement de l'information augmente.

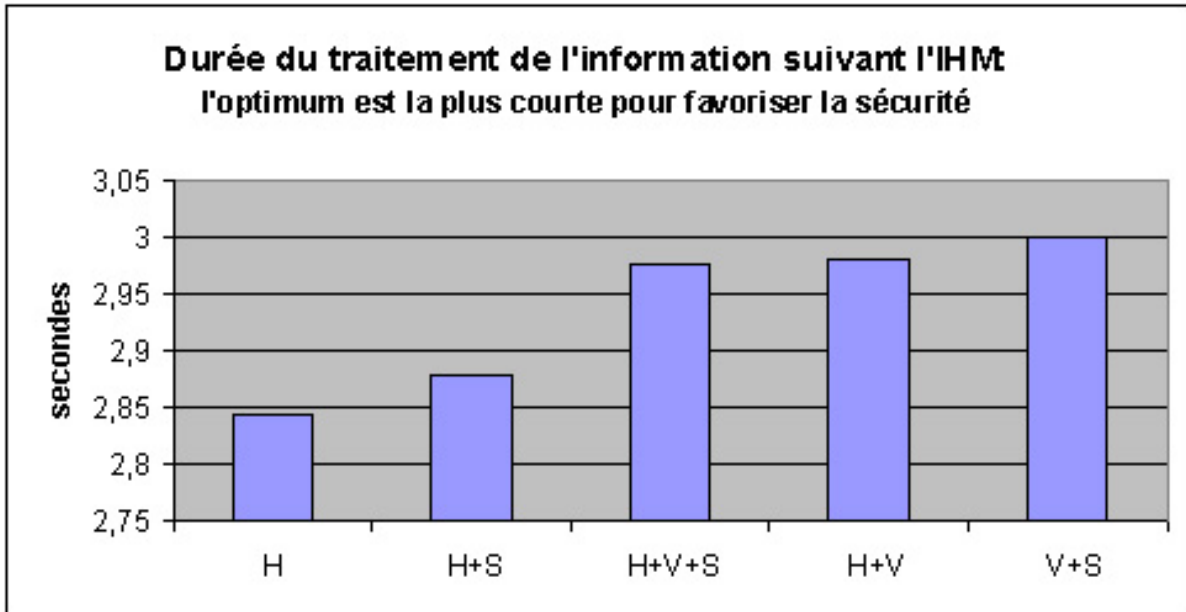


FIG. 4.11 – Temps pendant lequel le conducteur est soumis à l’alerte associée au système Time Warning, suivant l’interface proposée.

4.1.3.2.3.4 Conclusion issue des mesures physiologiques

L’idéal pour tout concepteur d’interfaces destinée à transmettre une information d’urgence est d’arriver au juste compromis entre le temps de perception le plus court et le temps de traitement le plus faible. Effectivement, une alarme peut être très rapidement perçue mais en même temps particulièrement invasive et détourner l’attention du conducteur à la route. Inversement une alerte facilement compréhensible peut être perçue avec un délai trop important. Il semblerait au vu de ces résultats que l’information transmise au conducteur pour le prévenir qu’il roule trop près du véhicule le précédant, via le durcissement de la pédale d’accélérateur, est vite et bien comprise. Ces résultats sont encourageants car ils sont issus d’une expérimentation où les conducteurs ne connaissaient préalablement ni le système Time Warning, ni les interfaces haptiques. Lorsque les conducteurs y seront habitués, les temps de traitement pourraient encore diminuer.

4.1.3.2.4 Résultats associés aux temps de suivi (temps inter-véhiculaires)

4.1.3.2.4.1 Temps de suivi moyens

Les résultats obtenus concernant les temps de suivi moyens sont présentés ci-dessous.

La significativité des différences observées a été évaluée statistiquement par le biais de t de Student. Rappelons que plus le temps de suivi est faible, plus la situation de conduite est critique. L'objectif du système étudié est d'aider le conducteur à maintenir un temps de suivi d'au moins 2 secondes. Nous avons comparé les temps de suivi moyens des conducteurs du groupe contrôle et ceux des conducteurs du groupe « test »⁹ dans différentes situations de conduite : tout d'abord sur la portion contrôle où aucun conducteur n'avait le Time Warning, puis sur la portion test où le Time Warning était activé pour les conducteurs du groupe « test », selon différentes modalités sensorielles. Dans un premier temps, nous n'avons pas distingué les différentes interfaces du système et nous avons juste comparé les résultats avec ou sans le Time Warning.

Portion contrôle		
Temps de suivi moyen (en s)	Groupe contrôle	Groupe « test »
Toute la portion contrôle	2,20	1,99
Vitesse $30 < v \leq 50$	2,20	2,03
Départementale	2,13	1,89
Départementale et $v \leq 30$	1,77	1,89
Départementale et $30 < v \leq 50$	1,71	1,63
Départementale et $50 < v \leq 90$	2,20	1,95

TAB. 4.4 – Temps suivi moyen des conducteurs sur la portion contrôle (les conducteurs n'ont aucune assistance) en fonction de leur groupe d'affectation

Sur la portion contrôle (première demi-heure de conduite où le Time Warning n'était pas activé), il n'y a aucune différence significative entre le temps de suivi moyen des conducteurs du groupe contrôle et celui des conducteurs des groupes « tests » qui n'avaient pas d'assistance ($p > 0,25$) (cf tableau page 194).

Alors qu'il n'y avait aucune différence significative sur la portion contrôle, on observe sur la portion test que les conducteurs du groupe contrôle (temps de suivi moyen : 1,87 s), qui n'avaient pas d'assistance, roulaient plus près que les autres conducteurs qui étaient assistés (temps de suivi moyen : 2,03s) et cette différence est statistiquement significative ($p < 0,05$) (cf. tableau page 195). L'activation du système Time Warning a augmenté le temps de suivi des conducteurs sur départementales, sur la nationale 118 et sur autoroute. Sur cette dernière, le temps de suivi moyen pour le groupe contrôle est inférieur aux 2

⁹Les conducteurs du groupe test sont ceux pour qui le Time Warning était activé en seconde partie du parcours, toutes interfaces confondues.

Portion test		
Temps de suivi moyen (en s)	Groupe contrôle	Groupe test
Toute la portion Test*	1,87	2,02
Portion test, sans ASD*	1,94	2,07
Portion test, ASD actif*	1,83	2,02
Vitesse $30 < v \leq 50$*	1,64	1,91
Départementale*	1,82	2,11
Départementale et $v \leq 30$ *	1,56	1,96
Départementale et $30 < v \leq 50$ *	1,61	1,91
Départementale et $50 < v \leq 90$ *	1,86	2,15
N118*	1,86	2,13
N118 et $50 < v \leq 90$ *	1,56	1,95
Autoroute*	1,92	2,04
Autoroute et Vitesse > 130 *	1,89	2,10

TAB. 4.5 – Temps suivi moyen des conducteurs sur la portion test (le système Time Warning était activé pour les conducteurs du groupe « test ») en fonction de leur groupe d'affectation - * Différence statistiquement significative (« t » de Student) entre les deux groupes ($p < 0,1$)

secondes nécessaires, alors qu'avec le système Time Warning, les conducteurs parviennent en moyenne à les respecter. Rappelons qu'à 130 km/H, un véhicule parcourt 3,6 mètres en 0,10 seconde. Les 0,21s gagnées sur autoroute lorsque la vitesse est supérieure à 130 km/h peuvent donc être précieuses en cas de freinage d'urgence. De même, sur la N118, à une vitesse comprise entre 50 et 90 km/h souvent liée à un trafic dense, la différence des temps de suivi moyen est de 0,39s en faveur du Time Warning, ce qui représente une distance de plus de 8 mètres à 75 km/h et 9,75 mètres à 90 km/h. Ces différences sont maintenues, voire accrues par le mode ASD qui permet de s'éloigner plus rapidement du véhicule cible par une augmentation du frein moteur lorsque la distance de sécurité n'est pas respectée et que le conducteur relève le pied de l'accélérateur.

Les différences observées entre les temps de suivi moyens du groupe contrôle et ceux du groupe ayant le Time Warning sont en faveur de ce système qui atteint son objectif en augmentant les distances de sécurité. Cependant, les différentes configurations du Time Warning ne produisent pas exactement les mêmes effets. Les résultats présentés dans le tableau 4.6 concernent d'une part la portion contrôle, puis la portion test où, pour les conducteurs du groupe « test », le Time Warning était activé, sans puis avec la fonction ASD active.

Temps de suivi moyens (en s)	C	Test	A2 + S	A1 + S	H	A2 + H	A1 + H	H + S	A2 + H + S	A1 + H + S
Portion Contrôle	2,20	1,99	2,21	1,88	2,23	1,98	1,83*	1,90	1,93	1,97
30 <Vitesse < 50	2,20	2,03	2,24	1,98	2,51	1,96	1,89	1,91	2,02	1,84
50 <Vitesse ≤ 90	2,24	1,98	2,05	1,91	2,33	1,87	1,84	1,95	1,95	2,00
Départementale	2,13	1,89	1,87	1,88	2,35	1,81	1,76	1,77	1,99	1,83
Départementale et $v \leq 30$	1,77	1,89	2,07	1,70	2,51*	1,97	2,10	1,74	1,87	1,54
Départementale Et $30 < v \leq 50$	1,71	1,63	1,43*	1,53	1,99*	1,68	1,61	1,61	1,65	1,55
Départementale et $50 < v \leq 90$	2,20	1,95	1,97	1,78*	2,40	1,69*	1,84	1,90	2,14	1,98

Toute la portion test	1,87	2,02*	2,08*	2,09	2,00	1,98	1,98	1,91	2,02	2,17*
------------------------------	------	-------	-------	------	------	------	------	------	------	-------

Portion test, sans ASD	1,94	2,06*	2,10*	2,18*	2,04	1,99	2,05	1,89	2,01	2,25*
Vitesse $30 < v \leq 50$	2,51	2,19	2,28	2,35	2,22	1,92	2,26	2,52	1,84*	2,43
Vitesse $50 < v \leq 90$	1,94	2,16	2,33*	2,62*	2,01	2,17	2,12	1,85	2,04	2,44*
Vitesse $90 < v \leq 110$	1,91	1,95	2,13	2,49*	1,74	1,85	1,84	1,73	2,05	2,05

Vitesse 110<v≤ 130	1,98	2,06	1,98	2,38*	2,20*	2,06	2,11	1,74*	2,08	2,15
Vitesse >130	1,89	2,10*	2,28*	2,08	2,14	2,02	2,14*	2,11	1,89	2,13
Départementale	1,96	2,26	2,55	2,60	2,10	2,12	2,21	2,12	2,15	2,48
Départementale et v≤ 30	1,76	2,26*	2,71	2,01	2,32	2,15	3,71	2,10	1,76	1,92
Départementale et 30<v≤ 50	1,88	1,93	1,99	2,15	1,80	1,67	2,06	2,11	1,77	2,08
Départementale et 50<v≤ 90	2,25	2,28	2,59	2,58	2,09	2,19	2,20	2,09	2,24	2,49
Autoroute	1,92	2,03	2,03	2,14	2,06	1,96	1,99	1,87	2,04	2,24
Autoroute et 50<v≤ 90	2,15	1,91	1,69	3,06	2,00	2,10	1,71	1,77	1,97	1,26
Autoroute et 90<v≤ 110	2,01	1,80	1,93	2,21	1,63	1,70	1,56*	1,65	2,18	1,79
Autoroute et 110<v≤ 130	1,95	2,07	1,96	2,71*	2,22*	2,02	2,07	1,77	2,05	2,13
Autoroute et v >130	1,89	2,10*	2,28*	2,08	2,14	2,02	2,14*	2,11	1,89	2,13
N118	1,81	2,09*	2,21*	2,58*	1,98	2,33*	1,72	1,82	2,11*	2,27*
N118 et 50<v≤ 90	1,56	1,95*	1,83	2,31*	2,09*	2,39*	1,78	1,56	1,91	2,11*
N118 et 90<v≤ 110	1,90	2,18	2,34	2,38	1,97	2,47	1,79	1,94	2,20	2,52*
N118 et 110<v≤ 130	1,90	2,03	2,17	2,11	1,90	2,41	1,93	1,26*	2,43	1,87

Portion test, ASD actif	1,83	2,02*	2,07*	2,05	2,02	1,98	1,97	1,95	2,03	2,12*
Vitesse 30<v≤ 50	1,64	1,91*	1,85	1,79	2,00*	1,69	1,90	1,87*	1,96*	2,18*
Vitesse 50<v≤ 90	1,87	2,04	2,11	2,07	2,08	1,98	1,97	2,04	2,01	2,11
Vitesse 90<v≤ 110	1,92	1,99	2,09	2,11	1,79	2,08	1,87	1,80	2,12	2,15
Vitesse 110<v≤ 130	1,88	2,09	2,28*	1,94	1,96	1,88	2,04	1,75	2,28*	2,44*
Départementale	1,82	2,11*	2,13*	2,09	2,13*	2,03	2,09*	2,11*	2,13*	2,17*
Départementale et v≤ 30	1,56	1,96*	1,71	1,89	2,06*	1,94	1,91	2,03*	1,96*	2,08*
Départementale et 30<v≤ 50	1,61	1,91*	1,85	1,79	2,01*	1,69	1,86*	1,86*	1,97*	2,18*
Départementale et 50<v≤ 90	1,86	2,15*	2,22*	2,12	2,16*	2,06	2,13	2,18*	2,14	2,18*
N118	1,86	1,94	2,02	1,96	1,86	1,96	1,89	1,76	2,01	2,11*
N118 et 30<v≤ 50	1,96	1,72	1,79	1,71	1,60	1,77	2,04	1,43	1,75	1,21
N118 et 50<v≤ 90	1,76	1,78	1,84	1,69	1,75	1,86	1,67	1,76	1,81	1,89
N118 et 90<v≤ 110	1,85	1,94	2,10	2,01	1,76	1,96	1,82	1,76	2,07	2,09
N118 et 110<v≤ 130	1,88	2,09	2,28*	1,94	1,96	1,89	2,04	1,75	2,27*	2,44*

TAB. 4.6: Temps de suivi moyen (en secondes) en fonction du groupe d'appartenance et des différentes situations de conduite - * Différence statistiquement significative par rapport au groupe contrôle ($p < 0,1$)

4.1.3.2.4.2 Temps de suivi moyens

Pour le groupe contrôle, le temps de suivi moyen est supérieur à 2 secondes sur la portion contrôle, sauf sur départementale, lorsque la vitesse est inférieure à 50 km/h. En revanche, sur la portion test, le temps de suivi moyen diminue significativement, excepté sur départementale entre 50 et 90 km/h. Sur la portion où l'ASD est enclenché pour les autres groupes, le temps de suivi moyen diminue davantage et n'est jamais au dessus des 2 secondes.

Pour le groupe « A2 + Sonore », le temps de suivi moyen est supérieur à 2 secondes sur la portion contrôle, sauf sur départementale et plus particulièrement lorsque la vitesse est comprise entre 30 et 50 km/h. Sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement, excepté entre 50 et 90 km/h sur autoroute et sur la Nationale 118. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est supérieur à 2 secondes sauf sur départementale lorsque la vitesse est inférieure à 50 km/h et sur la N118 lorsque la vitesse est inférieure à 90 km/h.

Pour le groupe « A1 + Sonore », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle. En revanche, sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement et supérieur à deux secondes dans tous les contextes étudiés. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est toujours supérieur à 2 secondes sauf sur départementale lorsque la vitesse est inférieure à 50 km/h et sur la N118 lorsque la vitesse est inférieure à 90 km/h. Pour le groupe « Haptique seul », le temps de suivi moyen est très supérieur à 2 secondes sur la portion contrôle. Sur la portion test, le temps de suivi moyen est proche des 2 secondes, excepté entre 30 et 50 km/h sur départementale et entre 90 et 110 km/h sur autoroute. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps

de suivi moyen est supérieur à 2 secondes sauf sur la N118 quelle que soit la vitesse.

Pour le groupe « A2 + Haptique », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle. En revanche sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement, excepté entre 30 et 50 km/h sur départementale et entre 90 et 110 km/h sur autoroute. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est supérieur à 2 secondes sauf sur la N118 quelle que soit la vitesse.

Pour le groupe « A1 + Haptique », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle, sauf sur départementale lorsque la vitesse est inférieure à 30 km/h. En revanche sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement, excepté entre 50 et 110 km/h sur autoroute et sur la N118 quelle que soit la vitesse. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est proche des 2 secondes, excepté entre 30 et 50 km/h sur départementale et sur la N118 entre 50 et 110 km/h.

Pour le groupe « Haptique + Sonore », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle. Sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement sur départementale et lorsque la vitesse est comprise entre 30 et 50 km/h. Cependant, le système n'est pas efficace sur le reste du parcours et les temps de suivi sont parfois inférieurs à ceux du groupe contrôle comme lorsque la vitesse est comprise entre 110 et 130 km/h. De plus, les temps de suivi moyens sont inférieurs à 2 secondes sur autoroute et sur la N118. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est de 1,76 seconde sur la N118, quelle que soit la vitesse. Pour le groupe « A2 + Haptique+ Sonore », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle. En revanche sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement, excepté sur départementale lorsque la vitesse est inférieure à 50 km/h et sur la N118 entre 50 et 90 km/h. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est proche des 2 secondes, excepté sur la N118 entre 30 et 90 km/h.

Pour le groupe « A1 + Haptique+ Sonore », le temps de suivi moyen est inférieur à 2 secondes sur la portion contrôle. En revanche sur la portion test, le temps de suivi moyen augmente significativement, excepté entre 50 et 110 km/h sur autoroute et sur la N118 entre 110 et 130 km/h. Sur la portion où l'ASD est enclenché, le temps de suivi moyen est

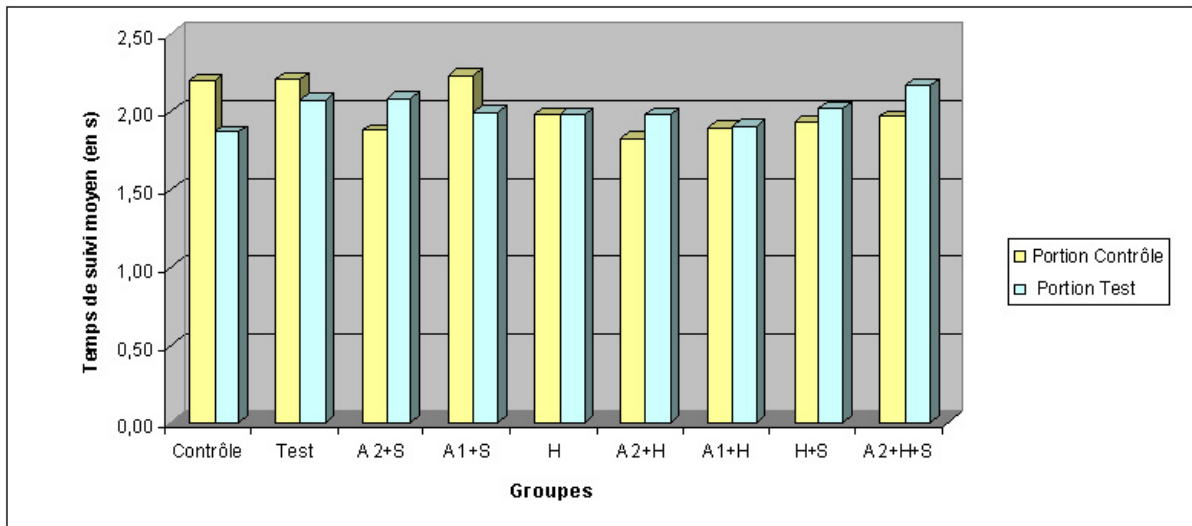


FIG. 4.12 – Temps de suivi moyen suivant la portion du parcours

proche des 2 secondes, excepté sur la N118 entre 30 et 90 km/h. On note notamment une augmentation du temps de suivi lorsque la vitesse est comprise entre 110 et 130 km/h sur la N118.

Ainsi, les résultats montrent que le Time Warning associé aux interfaces « visuelles plus sonores » a un réel effet sur le comportement des conducteurs. Leur temps de suivi sur la portion test a augmenté par rapport à la portion contrôle et se situe au dessus du seuil des deux secondes, plus particulièrement lorsque la vitesse est comprise entre 50 et 90 km/h ou sur la Nationale 118. L’affichage en zone « bas de pare-brise » (A1) associé à un bip sonore accentue l’effet du système et le temps de suivi moyen des conducteurs ayant eu ces interfaces est systématiquement au dessus des 2 secondes, alors qu’il était très souvent inférieur à ce seuil sur la portion contrôle. En revanche, les interfaces haptiques (associées ou non à des interfaces visuelles ou sonores) donnent de moins bons résultats lorsque la vitesse est comprise entre 90 et 110 km/h. Plus particulièrement, le système ne semble pas avoir influencé significativement les temps de suivi moyens du groupe « haptique + sonore ».

Sur la portion contrôle, les conducteurs ont un temps de suivi moyen inférieur aux deux secondes nécessaires à un minimum de sécurité, excepté ceux du groupe contrôle et du groupe A1 + S. Sur la portion test, le temps de suivi moyen du groupe contrôle diminue davantage que celui de tous les autres groupes. Ces derniers ont un temps de

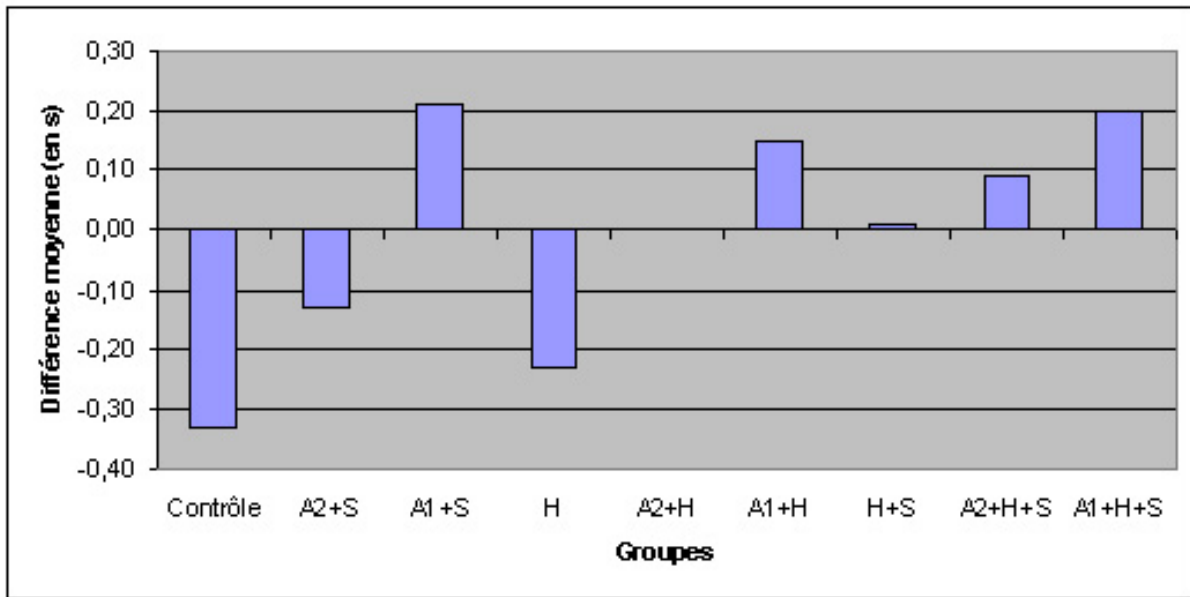


FIG. 4.13 – Variation des temps de suivi par rapport à la portion de l'essai

suivi moyen proche des 2 secondes, qui est le seuil de sécurité à respecter. Cela montre que le système est efficace sur la portion choisie, quelle que soit son interface. Nous avons calculé les variations du temps de suivi sur les deux portions de l'essai.

Alors que pour le groupe contrôle, le temps de suivi moyen diminue significativement sur la portion test, comparativement à la portion contrôle, cet effet est atténué voire inversé pour les conducteurs assistés par le Time Warning. Les conducteurs du groupe « interface haptique seule » ont certes diminué leur temps de suivi sur la portion test, mais dans une moindre mesure et surtout, leur temps de suivi moyen est de 2 secondes, contrairement au groupe contrôle (Temps suivi moyen = 1,87s). Les conducteurs pour qui la présentation des icônes visuelles se faisait en zone « bas de pare-brise » (A1) ont significativement augmenté leur temps de suivi par rapport à la portion contrôle ($p < 0,01$). Cette interface renforce donc l'efficacité du système.

Le temps de suivi moyen est beaucoup plus court pour le groupe contrôle qui n'a pas de système d'aide à la gestion des inter-distances que pour tous les autres groupes ($p < 0,05$). Les conducteurs assistés du Time Warning respectaient en moyenne les 2 secondes de temps de suivi. Cependant, il existe des différences selon les interfaces associées à ce système. Les groupes qui ont un temps de suivi moyen supérieur ou égal à 2 secondes sont les groupes correspondant aux interfaces A2 + Sonore, A1 + Sonore, Haptique seul, A2 +

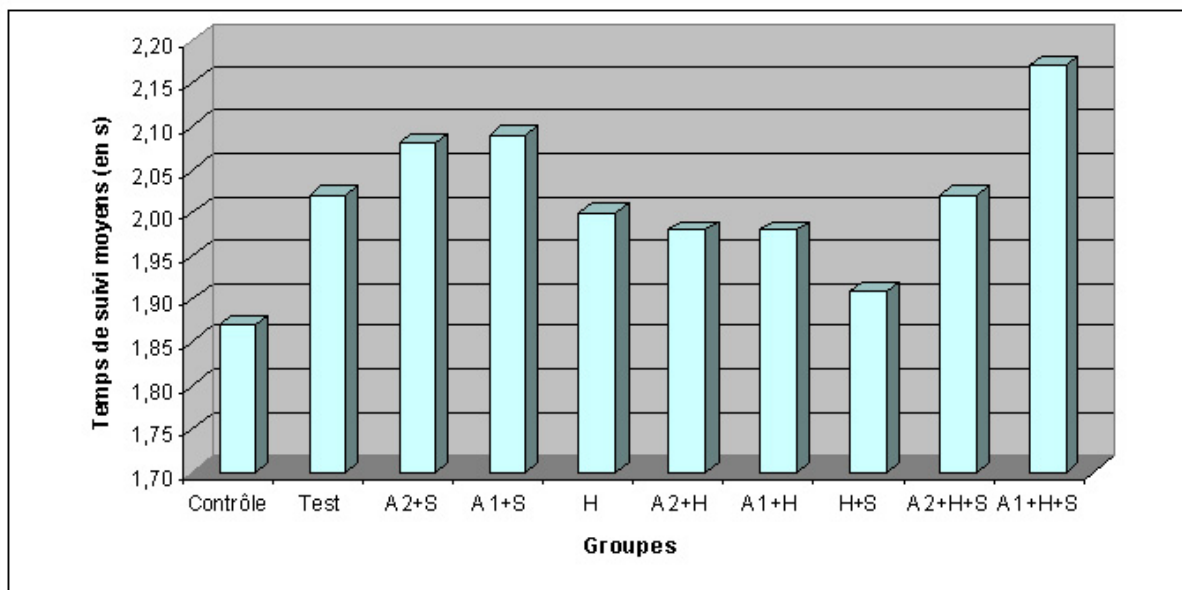


FIG. 4.14 – Temps de suivi moyen (en secondes) des différents groupes

Haptique + Sonore et A1 + Haptique + Sonore. Les groupes ayant une interface visuelle (A1 ou A2) associée à l'interface haptique ont des temps de suivi moyens très proches des 2s (1,98s). La présentation des icônes visuelles en zone A1 entraîne des temps de suivi plus courts que l'affichage en zone A2. Enfin, seuls les conducteurs du groupes « Haptique + Sonore » ne semblent pas avoir été aidés par le Time Warning car leurs performances sont les moins bonnes parmi les groupes ayant le système activé et notamment moins bonnes que celles du groupe « haptique seul », leur temps de suivi moyen est même plus proche de celui du groupe contrôle. .

4.1.3.2.4.3 Répartition des temps de suivi par rapport au seuil des deux secondes

La moyenne des temps de suivi pour chacun des groupes est certes une donnée très intéressante, mais elle n'était pas suffisante pour évaluer les différents groupes et l'apport du Time Warning. Il nous a paru pertinent de calculer le pourcentage du temps passé en dessous et au dessus du seuil des deux secondes (pourcentage calculé par rapport au temps total à suivre un véhicule).

Pour tous les groupes assistés par le Time Warning, excepté celui ayant eu l'interface « Haptique seul », il y a une différence importante entre la portion contrôle et la portion

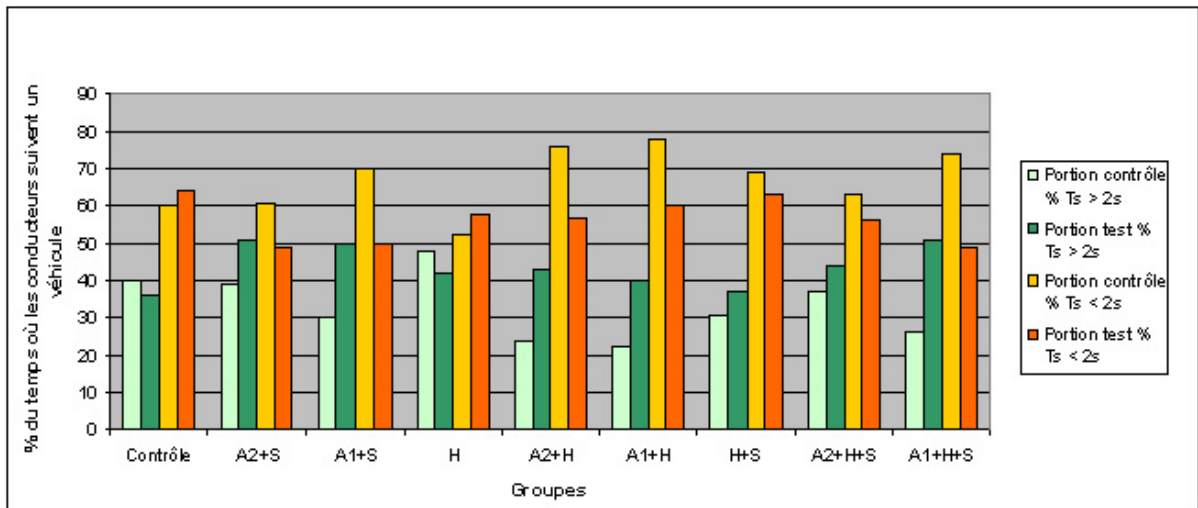


FIG. 4.15 – Répartition du temps passé en dessous et au dessus du seuil des deux secondes par groupe

Répartition du temps passé en dessous et au dessus du seuil des deux secondes (par rapport au temps total où les conducteurs suivent un véhicule) par groupe

test : le pourcentage du temps passé en dessous du seuil des 2 secondes diminue au profit d'un respect des distances minimales de sécurité. L'interface visuelle accentue ce phénomène comme le montrent les résultats des groupes A1 + S, A2 + H, A1 + H et A1+H+S.

Par ailleurs, nous avons calculé la répartition des temps de suivi des conducteurs dans les intervalles suivants :

- intervalle 0 : Temps de suivi ≤ 2 s ;
- intervalle 1 : $1s \leq$ Temps de suivi < 2 s ;
- intervalle 2 : $0,5s \leq$ Temps de suivi $< 1s$

et calculé pour chacun de ces intervalles le ratio suivant :

$$r = \frac{(p_{test} - p_{cont})}{p_{cont}}$$

avec

$$p_{test} = \text{Pourcentage du temps passé dans l'intervalle sur la portion test}$$

$$p_{cont} = \text{Pourcentage du temps passé dans l'intervalle}$$

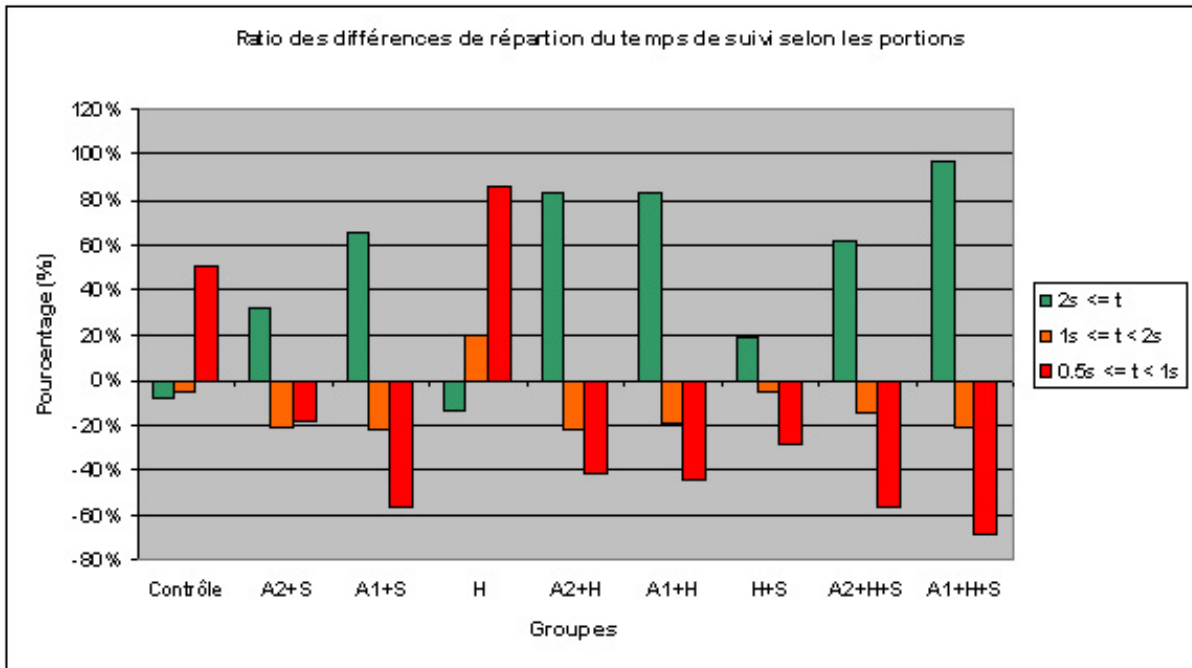


FIG. 4.16 – Ratio des différentes répartitions du temps de suivi par rapport au seuil des 2 secondes

sur la portion contrôle

Le temps passé dans l'intervalle $2s \leq t$ diminue sur la portion test pour le groupe contrôle (-9%), alors qu'il augmente pour tous les autres groupes (sauf le groupe haptique : -13%). Cet effet est accentué pour les groupes « A1 + Sonore »(+66%), « A2 + Haptique »(+83%), « A1 + Haptique »(+83%), « A2 + Haptique + Sonore »(+61%), « A1 + Haptique + Sonore »(+97%) qui ont tous une interface visuelle. Pour les conducteurs ayant une présentation des informations visuelles dans la zone « bas de pare-brise », l'augmentation est comprise entre 66% et 97%. En revanche, les groupes ayant eu une interface haptique sans interface visuelle ont de moins bons résultats.

Le temps passé dans l'intervalle $1s \leq t < 2s$ diminue très faiblement sur la portion test pour le groupe contrôle (-5%). Cet effet est accentué par le Time Warning, excepté pour le groupe « Haptique seul »(+20%) pour qui ce temps augmente et pour le groupe « Haptique + Sonore »(-5%) pour qui la diminution est très faible et équivalente à celle du groupe contrôle. Notons que pour tous les groupes comprenant une interface visuelle,

la diminution est d'au moins 14% et pour ceux pour qui son affichage avait lieu dans la zone « A1 », elle est d'au moins 20% .

Le temps passé dans l'intervalle $0,5s \leq t < 1s$ augmente de 50% sur la portion test pour le groupe contrôle, alors qu'il diminue pour tous les autres groupes (sauf le groupe haptique : +86%). Cet effet est accentué pour les groupes ayant une interface visuelle (« A2 + Sonore »(-18%) ; « A1 + Sonore »(-56%), « A2 + Haptique »(-41%), « A1 + Haptique »(-45%), « A2 + Haptique + Sonore »(-56%), « A1 + Haptique + Sonore »(-68%).

Ainsi le Time Warning diminue dans l'ensemble la durée passée dans l'intervalle 1 (1 s = Temps de suivi < 2 s) et dans l'intervalle 2 (0,5s = Temps de suivi < 1s), au profit du temps passé dans l'intervalle 0 (Temps de suivi = 2 s). Cependant, les interfaces visuelles, a fortiori si elles sont affichées dans la zone A1, accentuent significativement cet effet. En revanche, les conducteurs ayant eu le Time Warning associé à une interface haptique seule ont des résultats similaires à ceux des conducteurs du groupe contrôle. Cela peut s'expliquer par le fait qu'ils avaient sur la portion contrôle un temps de suivi supérieur au seuil des 2 secondes et que le système leur a été moins utile.

4.1.3.2.4.4 Durée moyenne des intervalles durant lesquels le temps de suivi est inférieur à 2 secondes

Outre la répartition du temps de suivi par rapport au seuil des 2 secondes, nous nous sommes intéressés à la durée moyenne des intervalles de temps passé au dessus et au dessous des 2 secondes. Pour calculer cette durée moyenne, nous avons divisé le temps passé dans la portion par le nombre d'intervalles de cette portion. Les résultats sont présentés sur la figure 4.17 en page 207.

Pour le groupe contrôle, la durée moyenne des intervalles passés au dessus et au dessous des 2 secondes augmentent entre la portion contrôle et la portion test. Alors que cette augmentation est de l'ordre d'une seconde pour les intervalles passés au dessus du seuil de sécurité, elle est de plus de trois secondes pour les intervalles passés en dessous de ce seuil. Pour les groupes ayant le Time Warning sur la portion test, la durée moyenne augmente davantage que pour le groupe contrôle pour les intervalles passés au dessus des 2 secondes

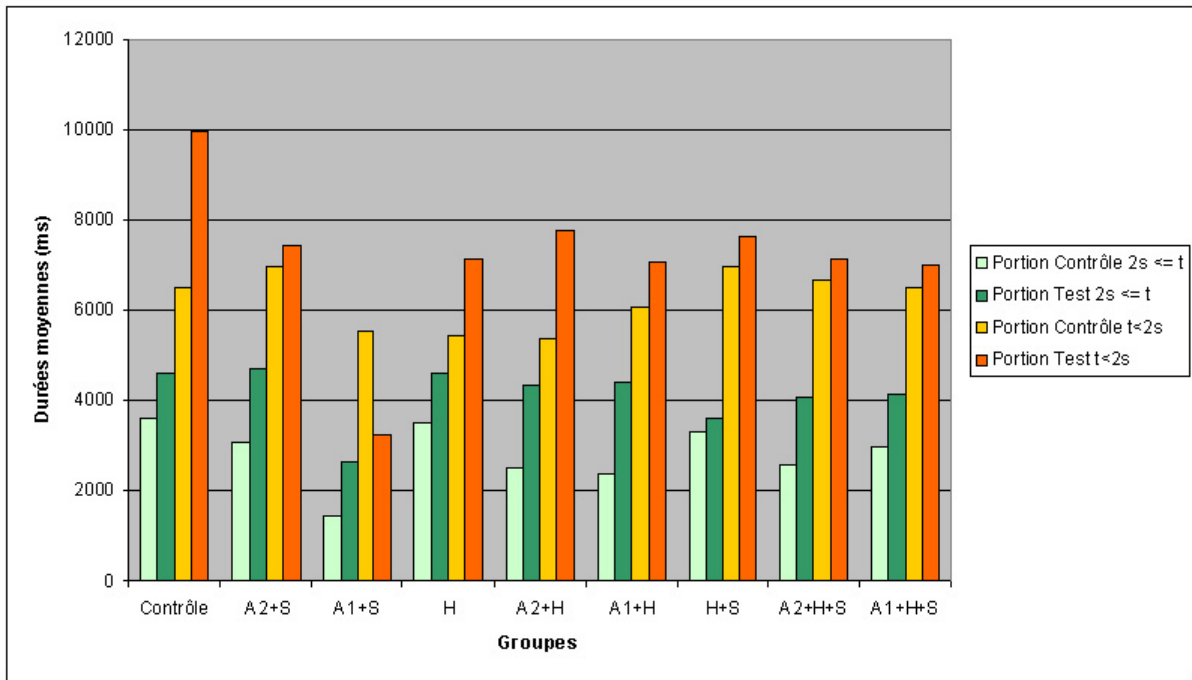


FIG. 4.17 – Durée moyenne des intervalles au dessus et en dessous de 2 secondes

et dans une moindre mesure pour les intervalles passés en dessous des 2 secondes. Le Time Warning permet d'éviter la forte augmentation de la durée moyenne sur la portion test présente pour le groupe contrôle, bien que cet effet soit moins important pour les groupes « Haptique seul » et « A2 + Haptique ». De plus, sur la portion test, les conducteurs du groupe contrôle restent en moyenne significativement plus longtemps dans la zone critique (10 s) que tous les autres groupes qui restent en moyenne moins de 8 secondes ($p < 0,01$). Enfin, le groupe « A1 + Sonore » est le seul groupe pour lequel la durée moyenne des intervalles passés en dessous des 2 secondes diminue sur la portion test par rapport à la portion contrôle.

Afin de mieux visualiser l'évolution de la durée moyenne entre la portion contrôle et la portion test, nous avons calculé le ratio suivant :

$$r = \frac{(p_{test} - p_{cont})}{p_{cont}}$$

avec

$$p_{test} = \text{Pourcentage du temps passé dans l'intervalle}$$

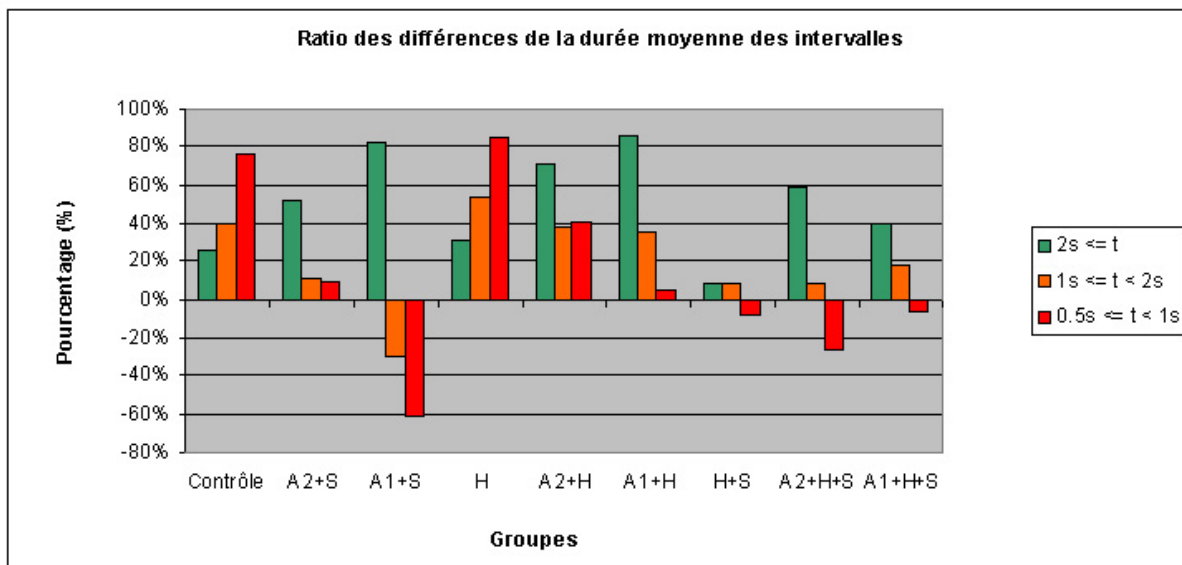


FIG. 4.18 – Ratio de la durée moyenne passée dans chaque intervalle

sur la portion test

$$p_{cont} = \frac{\text{Pourcentage du temps passé dans l'intervalle}}{\text{sur la portion contrôle}}$$

pour les intervalles suivants :

- intervalle 0 : Temps de suivi = 2 s ;
- intervalle 1 : 1s = Temps de suivi < 2 s ;
- intervalle 2 : 0,5s = Temps de suivi < 1s.

Pour le groupe contrôle, les durées moyennes des différents intervalles augmentent entre la portion contrôle et la portion test, mais beaucoup plus pour l'intervalle $0,5s \leq t < 1s$ qui est l'intervalle le plus critique.

Excepté pour le groupe « Haptique seul » qui a une évolution similaire à celle du groupe contrôle, le système Time Warning réduit, voire inverse l'augmentation des durées moyennes des intervalles où le temps de suivi est inférieur à 2 secondes et cet effet est encore plus important pour les intervalles les plus critiques ($0,5s \leq t < 1s$). Les conducteurs du groupe « A1 + sonore » parviennent à respecter plus longtemps le seuil des 2 secondes nécessaires à une meilleure sécurité et restent moins longtemps dans les zones critiques. Le

système Time Warning ne permet pas de supprimer complètement les situations critiques, mais les conducteurs en sortent plus vite avec le système que sans.

4.1.3.2.5 Adéquation de la réponse comportementale des conducteurs aux interfaces du système

Lors de la phase d'expérimentation sur route, aucune des interfaces associées au Time Warning n'a provoqué de réaction inadaptée voire dangereuse chez les conducteurs. L'analyse des données vidéo réalisée a posteriori a confirmé cette absence de comportement inadapté qu'aurait pu induire le système. Aucune réaction de surprise ou de panique n'a été provoquée. Ainsi, l'utilisation de la pédale d'accélérateur active et notamment les vibrations dans le cadre du système Time Warning, ne présente pas de danger pour le conducteur et les autres usagers de la route. Notons par ailleurs que si le système Time Warning aide le conducteur à respecter les 2 secondes de temps de suivi, il n'entraîne pas pour autant une augmentation excessive de cette distance qui serait préjudiciable pour la fluidité du trafic. Les temps de suivi moyens observés sont bien de l'ordre des 2 secondes ce qui était l'objectif de ce système.

4.1.3.3 Conclusion concernant le Time Warning

Les différentes mesures utilisées pour l'évaluation du Time Warning ont globalement données des résultats en faveur du système. Selon les réponses aux questionnaires, il était jugé utile, ce qui a été confirmé objectivement par les résultats associés aux temps de suivi. L'efficacité du système a été également mise en évidence par ces deux types de mesures. Cependant, il faut noter que les résultats varient en fonction des interfaces associées au Time Warning. Les interfaces haptiques évaluées sont adaptées au Time Warning et même si des améliorations peuvent encore être apportées, elles ont été non seulement comprises et acceptées par les conducteurs, mais elles entraînent des résultats très satisfaisants, sans détourner le regard de la route. Cependant, les résultats sont meilleurs lorsqu'elles sont associées à une interface visuelle. Cette dernière permet certainement une compréhension plus rapide du fonctionnement du système car elle explicite par une icône visuelle ce que le conducteur ressent dans le pied. Concernant les icônes visuelles, l'affichage en zone « bas

de pare-brise »(A1) était plus approprié que leur affichage sur le tableau de bord (A2). Ce résultat, certes prévisible, confirme que la présentation des icônes dans l'axe du regard est plus confortable pour le conducteur et mieux adaptée au système Time Warning.

Associées au Time Warning, les interfaces innovantes évaluées (la pédale d'accélérateur active et l'affichage des icônes visuelles en zone « bas de pare-brise ») étaient donc plus adaptées que les interfaces classiquement utilisées (affichage des icônes visuelles sur le tableau de bord et bip sonore). Cependant, il était intéressant de savoir si ces interfaces conviendraient toujours si elles étaient associées à un autre système d'aide. Une évaluation de ces interfaces a été menée pour un système d'aide différent : le Curve Warning qui est un système d'aide à la gestion de virages. Ces deux systèmes ont en commun le fait qu'ils avertissent le conducteur dès lors qu'il se trouve dans une situation accidentogène, que leurs interfaces ne doivent pas trop détourner l'attention du conducteur de la route et que l'effet que doit produire l'interface haptique chez le conducteur est un levé de pied de l'accélérateur.

4.2 Interfaces innovantes appliquées au système Curve Warning

4.2.1 Présentation du système

L'arrivée trop rapide sur un virage dangereux ou un rond point sont des situations accidentogènes. La prise de virage ne va pas sans entraîner divers problèmes. Un freinage ou une accélération lors de la prise de virage peut avoir de graves conséquences. La description ci-après illustre les problèmes associés aux virages :

Ainsi, l'objectif est d'arriver sur le virage à une vitesse adaptée, afin de ne pas avoir à moduler sa vitesse. Cependant, sur route inconnue par exemple, il est difficile d'estimer la « bonne vitesse » et tous les virages dangereux ne sont pas signalés. De plus, la limitation est parfois de 50 km/h alors que cette vitesse est trop élevée par rapport au rayon de courbure du virage. Enfin, les panneaux de signalisation peuvent être masqués ou non

Le virage

Faire tourner votre voiture peut vous sembler naturel. Il n'en est rien. Un changement de direction est une manœuvre qui fait intervenir un grand nombre de paramètres et peut potentiellement présenter un danger, pour vous ou les passagers de la voiture, si elle est mal exécutée.



Le transfert de masses :

Saviez-vous que votre voiture est comme posée en équilibre sur ses quatre roues ? Lorsque vous freinez, accélérez ou virez, vous perturbez cet équilibre. Voici, en quelques schémas, ce qu'il faut que vous gardiez à l'esprit.



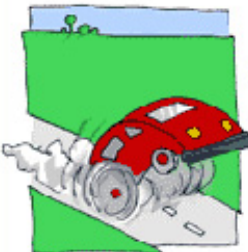
Vous roulez tout droit :

la masse du véhicule est répartie de manière égale sur les quatre roues (c'est un schéma théorique : en réalité, la plupart des voitures ont plus de masse sur l'avant, à cause du poids du moteur).



Vous freinez

la masse du véhicule est transférée vers l'avant, en fonction de la force du freinage : cela déleste les roues arrière et diminue leur adhérence.



Vous accélérez

la masse du véhicule est transférée vers l'arrière, en fonction de la force de l'accélération : cela déleste les roues avant et réduit leur adhérence et leur pouvoir directionnel.



Vous tournez

la masse est transférée sur les roues se trouvant à l'extérieur du virage : c'est la force centrifuge. Cela déleste les roues se trouvant à l'intérieur, selon la vitesse de la voiture et le rayon du virage - cela pousse aussi les passagers contre les portières.

Là où ça devient dangereux, c'est quand les effets se combinent.



Freinage + virage = sur-virage

la masse se déplace vers l'avant et l'extérieur du virage, l'arrière étant délesté, l'adhérence est réduite. Généralement, entamer un virage en ralentissant, même lorsque l'on ne freine pas, suffit à provoquer un sur-virage et peut parfois faire déraiper la voiture.

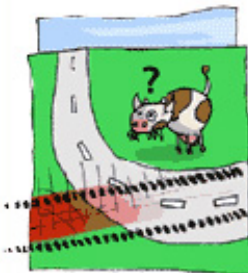


! La solution pour corriger un survirage ?

D'abord débrayer (pour répartir les masses), regarder là où vous voulez aller, pas là où vous avez peur d'aller et contre-braquer : si vous regardez dans la bonne direction, cela se fera naturellement.

▶ Accélération + virage = sous-virage

la masse se déplace vers l'arrière et l'extérieur du virage. Il ne s'exerce pratiquement plus de charges sur une roue, la moitié de la masse de la voiture repose sur la roue arrière extérieure. Conséquence : l'avant refuse de s'engager, puisque les roues avant ont perdu leur pouvoir directionnel, c'est le sous-virage.



! La solution pour corriger un sous-virage ?

Décélérer progressivement pour charger l'avant. Ensuite, ne pas sur-braquer, mais débraquer, c'est-à-dire tourner le volant dans le sens contraire du virage : cela vous évitera des mauvaises surprises lors que l'avant aura retrouvé son pouvoir d'adhérence.

▶ Les conseils du Professeur Parcho k



! Abordez toujours un virage à une allure plus modérée. Sachez les anticiper, afin d'adapter votre vitesse suffisamment tôt. En cas de freinage d'urgence, évitez de bloquer les roues, vous ne pourriez plus diriger la voiture dans le virage : freinez soit par à coups, soit dégressivement (un à-coup profond, puis levez progressivement mais rapidement le pied, pour ne pas bloquer les roues).

Source : MMA/Zérotracas.com - 2004

perçus si l'attention du conducteur est portée ailleurs. Un système qui serait capable de prévenir le conducteur lorsque sa vitesse est trop élevée par rapport aux courbes de la route semble donc utile pour toutes les raisons précédentes.

Cependant, même s'il existe un point commun entre le Time Warning et le Curve Warning (le système doit induire une réduction de la vitesse du véhicule), le Curve Warning a une contrainte tout à fait particulière : celle de prévenir le conducteur suffisamment en amont du virage pour qu'il ralentisse avant le virage et surtout pas pendant la prise du virage. Comme nous l'avons vu précédemment, il est dangereux de freiner ou de ralentir brusquement à l'intérieur d'un virage car cela peut entraîner une déviation de la trajectoire, voire une sortie de route. Le système Curve Warning doit donc informer le conducteur que sa vitesse n'est pas adaptée à la courbe suivante, suffisamment tôt pour que ce dernier puisse ajuster la vitesse de son véhicule avant l'entrée dans cette courbe. Il faut également avertir si la courbe est un virage vers la droite, vers la gauche ou un rond-point.

4.2.2 Mise au point des interfaces à évaluer

L'objectif principal du Curve Warning est de limiter les accidents en virage en réduisant la vitesse d'approche. Il est alors essentiel que les interfaces soient adaptées aux caractéristiques des situations de conduite dans lesquelles sera impliqué le système. Ainsi, les informations transmises par ce système devront aider le conducteur à réaliser sa tâche principale et non la concurrencer.

Compte tenu des caractéristiques de la situation de conduite associée à ce système, il est essentiel de prévenir le conducteur suffisamment tôt pour qu'il ne se retrouve pas en situation d'urgence. De plus, si ce dernier ne réagit pas assez vite ou de façon inappropriée, il est important d'avoir encore le temps de l'avertir de la criticité de la situation. Deux niveaux d'alerte ont donc été prévus pour ce système : la première alerte est diffusée au conducteur lorsque ce dernier arrive à 150 mètres du virage dangereux à une vitesse supérieure à celle prévue par la législation. C'est un niveau d'alerte orange. La seconde alerte est diffusée si le conducteur ne ralentit pas suffisamment et que sa vitesse reste

inappropriée à la courbe du virage. C'est un niveau d'alerte rouge.

Dans un premier temps, des icônes visuelles, affichées sur le tableau de bord, ont été envisagées pour ce système. Leur avantage est qu'elles peuvent préciser la nature du problème (virage vers la droite, vers la gauche ou rond-point), la distance à laquelle il se trouve, etc. Cependant, les principaux inconvénients de ces interfaces sont que d'une part elles détournent l'attention du conducteur de la route où se situe le danger et d'autre part, si l'icône visuelle est située sur le tableau de bord classique, elle peut être masquée par le volant, si ce dernier n'est pas droit. Nous avons donc envisagé une présentation des icônes visuelles en zone « bas de pare-brise »(A1).

Une interface sonore, de type bip sonore, peut également être associée à ce système, mais comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, un bip sonore n'est pas suffisamment informatif sur le teneur du problème. Les interfaces classiquement utilisées ne semblent pas totalement répondre aux besoins du Curve Warning, les interfaces haptiques sont apparues comme une solution plus appropriée, puisqu'elles permettaient d'agir directement sur le pied du conducteur et pouvaient l'inciter à le lever. Comme pour le Time Warning, un durcissement progressif de la pédale et des vibrations sont les interfaces haptiques qui ont été retenues pour le Curve Warning, le jerk et les coups de béliers ayant été rejetés par les experts. Plus le conducteur arrive à une vitesse élevée par rapport au virage, plus le durcissement de la pédale est important et en cas de vitesse réellement inadaptée, des vibrations se produisent.

Nous avons ensuite évalué les différentes interfaces possibles du Curve Warning, en comparant les interfaces classiques à la pédale active et à une présentation visuelle des icônes en zone « bas de pare-brise »(A1). Les différentes interfaces que nous avons testées pour le système Curve Warning sont présentées sur le schéma 4.19 page 215.

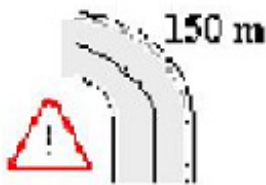
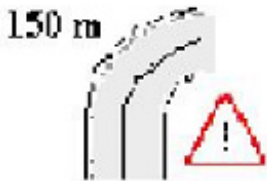

Système		Curve Warning : cas de l'arrivée trop rapide sur virage dangereux ou rond point	
2 niveaux d'alerte		Orange	Rouge
Situations		Orange : Virage dangereux ou rond point à 150 m, vitesse inadaptée	Arrivée trop rapide sur virage dangereux ou rond point
Interfaces visuelles	Icônes visuelles : virage à gauche		"Ralentir Virage dangereux"
	Icônes visuelles : virage à droite		"Ralentir Virage dangereux"
	Icônes visuelles : rond point		"Ralentir Rond Point"
Interfaces sonores	Néant		Bip sonore
Interfaces haptiques	Début du durcissement de la pédale d'accélérateur, qui augmente progressivement		Force maximale dans la pédale, associée à des vibrations de la pédale

FIG. 4.19 – Interfaces du Curve Warning

Comme pour le Time Warning, nous ne préconisons pas à priori l'utilisation de ces trois modalités sensorielles simultanément. Notre objectif était plutôt d'établir les interfaces possibles, associées à chacune des modalités sensorielles et de comparer les interfaces innovantes (pédale active, écran LCD dans la zone « bas de pare-brise ») aux interfaces classiques.

4.2.3 Evaluation du Curve Warning

L'objectif de cette expérimentation était double. D'une part, nous voulions obtenir une première évaluation du Curve Warning (notamment en termes d'utilité et d'acceptabilité) et d'autre part utiliser les interfaces innovantes (la pédale active et l'affichage d'icônes visuelles sur un écran LCD « en bas de pare-brise ») dans un contexte différent de celui du Time Warning.

90 conducteurs ont pris part à cette évaluation qui s'est déroulée sur une départementale comportant des virages dangereux qui n'étaient pas toujours signalés comme tels. Il y avait également des ronds-points et des successions de virages. La seule explication qui était donnée aux conducteurs concernant le système était que le véhicule était équipé d'un système qui les avertirait lorsqu'ils arriveraient trop vite sur un virage ou rond-point. Aucune information n'était donnée sur la manière dont cela se produirait, les conducteurs découvraient donc, en situation, les interfaces associées à leur groupe. Cela nous permettait notamment de connaître les premières réactions associées à la pédale active lorsque les conducteurs ignoraient encore tout de son existence.

Rappelons que la mise au point de ce système étant moins avancée que celle du Time Warning, cette expérimentation permettait essentiellement de recueillir les premières données nécessaires à la finalisation de ce système. Le recueil de données subjectives nous a donc semblé être approprié car il permettait de connaître rapidement la perception de ce système par les conducteurs. Ainsi, à l'issue de la phase de conduite, un entretien-bilan était mené auprès de chaque conducteur.

4.2.3.1 Résultats issus de l'entretien-bilan

L'entretien-bilan était mené sur la base des questions présentées ci-après. Les réponses moyennes des conducteurs sont indiquées entre parenthèses. La significativité des résultats obtenus a été évaluée par le biais du test du χ^2 . L'astérisque (*) indique que les résultats sont statistiquement significatifs ($p < 0.01$)

- **Quel est selon vous l'objectif de ce système ?**

- Prévenir si on arrive trop vite sur un virage, évite de rentrer trop vite dans un virage **(48% des réponses)**
- Prévenir de la configuration de la route, du danger **(44%)**
- La sécurité **(18%)**
- Faire ralentir, diminuer la vitesse avant le virage **(16%)**
- Éviter un accident, une sortie de route **(13%)**
- Rappel, remplace la signalisation **(7%)**

- **Trouvez vous ce système :**

Pas du tout utile (1,1%)	Peu utile (1,1%)	Moyennement utile (17,2%)	Utile (55,2%)*	Très utile (25,3%)
--------------------------	------------------	---------------------------	-----------------------	--------------------

- **Pourquoi ?**

- Permet d'être prévenu de danger **(43% des réponses)**
- Surtout sur route inconnue **(42%)**
- La sécurité **(18%)**
- Permet de ralentir avant le virage **(17%)**
- Pour ceux qui roulent vite **(10%)**
- Surtout la nuit **(8%)**
- Éviter un accident **(7%)**
- Utile lorsqu'on est fatigué **(6%)**
- Dans les cas de faible adhérence **(5%)**

- Durant l'essai que vous avez effectué aujourd'hui, avez-vous été surpris par certains virages ?

Non (58%)	Oui (42%)
------------------	-----------

- Si oui, lesquels ?

- Un des derniers virages (montée après Abbaye de Cernay) **(38% des réponses)**
- Le premier des 17 tournants **(32%)**
- Celui de la mare **(21%)**
- ➔ **Ce sont tous des virages qui se resserrent**

• **Avez-vous trouvé que le système vous a averti de façon adaptée:**

Pas du tout (0%)	Peu (15,2%)	Moyennement (18,2%)	Plutôt (42,4%)*	Tout à fait (24,2%)
------------------	-------------	---------------------	------------------------	---------------------

• **Pourquoi ?**

Points positifs :

- Bonnes interfaces **(55% des réponses)**
 - Bonnes interfaces haptiques **(58% des réponses totales, 56% des réponses "Bonnes interfaces")**
 - Force dans la pédale bien jugée par **40%** des conducteurs (39%des réponses "Bonnes interfaces", 70% des réponses "Bonnes interfaces haptiques")
 - Vibrations dans la pédale bien jugées par **18%** des conducteurs (et 17% des réponses "Bonnes interfaces" et 30% des réponses "Bonnes interfaces haptiques")
 - Bonnes interfaces visuelles **(25% des réponses totales, 34% des réponses "Bonnes interfaces")**
 - Bonnes interfaces sonores **(10% des réponses totales, 7% des réponses "Bonnes interfaces")**
- Le système se déclenche au bon moment **(22%)**

Points négatifs :

- Le système ne se déclenche pas au bon moment **(26% des réponses)**
 - Le système se déclenche trop tard **(11% des réponses totales, 42% des réponses "pas au bon moment")**
 - Le système se déclenche trop tôt **(5% des réponses totales, 21%des réponses "pas au bon moment")**
- La force dans la pédale n'est pas perçue par **25% des conducteurs ayant eu cette interface**, dont :
 - 56% des conducteurs du groupe "haptique seul"
 - 40% des conducteurs du groupe "haptique et sonore"
 - 27% des conducteurs du groupe "visuel, haptique et sonore"

19% des conducteurs du groupe "visuel et haptique "

➤ Sans explication préalable, l'interface haptique n'est pas comprise par **13% des conducteurs**

➤ Sonore intrusif, pénible, à revoir (**7%**)

➤ **Le système n'a pas fonctionné dans 10% des cas**

- **Concernant les interfaces du système, les avez-vous trouvées explicites ?**

Pas du tout (1,5%)	Peu (4,5%)	Moyennement (9,1%)	Plutôt (40,9%)*	Tout à fait (43,9%)*
--------------------	------------	--------------------	-----------------	----------------------

- **Détaillons les différentes interfaces que vous avez rencontrées (visuelles, sonores et pédales selon votre condition de passation). Les avez-vous trouvées :**

⇒ **explicites ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (1,8%) <i>en A2 (0%)</i> <i>en A1 (4%)</i>	Visuel (7,3%) <i>en A2 (6,7%)</i> <i>en A1 (8%)</i>	Visuel (7,3%) <i>en A2 (6,7%)</i> <i>en A1 (8%)</i>	Visuel (41,8%)* <i>en A2 (46,7%)*</i> <i>en A1 (36%)*</i>	Visuel (41,8%)* <i>en A2 (40%)*</i> <i>en A1 (44%)</i>
Sonore (7,1%)	Sonore (7,1%)	Sonore (7,1%)	Sonore (53,6%)*	Sonore (25%)
Haptique (5%)	Haptique (12,5%)	Haptique (12,5%)	Haptique (37,5%)*	Haptique (32,5%)

⇒ **adaptées ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (0%) <i>en A2 (0%)</i> <i>en A1 (0%)</i>	Visuel (9,1%) <i>en A2 (10%)</i> <i>en A1 (8%)</i>	Visuel (7,3%) <i>en A2 (6,7%)</i> <i>en A1 (8%)</i>	Visuel (56,4%)* <i>en A2 (60%)*</i> <i>en A1 (52%)*</i>	Visuel (27,3%) <i>en A2 (23,3%)</i> <i>en A1 (32%)</i>
Sonore (0%)	Sonore (14,3%)	Sonore (21,4%)	Sonore (39,3%)*	Sonore (25%)
Haptique (0%)	Haptique (10%)	Haptique (12,5%)	Haptique (40%)*	Haptique (37,5%)

⇒ **facilement perçues ?**

Très mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très bon
Visuel (10,9%) <i>en A2 (16,7%)</i> <i>en A1 (4%)</i>	Visuel (9,1%) <i>en A2 (13,3%)</i> <i>en A1 (4%)</i>	Visuel (14,5%) <i>en A2 (16,7%)</i> <i>en A1 (12%)</i>	Visuel (38,2%)* <i>en A2 (33,3%)</i> <i>en A1 (44%)*</i>	Visuel (27,3%) <i>en A2 (20%)</i> <i>en A1 (36%)</i>
Sonore (0%)	Sonore (0%)	Sonore (7,1%)	Sonore (32,1%)	Sonore (60,7%)*
Haptique (0%)	Haptique (10%)	Haptique (15%)	Haptique (37,5%)*	Haptique (37,5%)*

Scores moyens associés à l'appréciation des interfaces

(1 = Très mauvais à 5 = Très bon)

Interfaces	Explicites ?	Adaptées ?	Facilement perçues ?
Visuelles	4,15	4,02	3,62
<i>en A2</i>	4,2	4	3,3
<i>en A1</i>	4,1	4,1	4
Sonores	3,82	3,75	4,54
Haptiques	3,8	4,05	4,03

• **Avez vous des remarques particulières à faire sur ce système ?**

- L'interface haptique n'est pas perçue ou explicite **(70% des réponses)**
 - La force n'est pas perçue ou explicite **(25% des réponses, 88% des réponses à "interface haptique pas perçue ou explicite")**
 - Les vibrations ne sont pas comprises par **10%** des réponses, "on dirait l'ABS", (12% des réponses à "interface haptique pas perçue ou explicite")
- L'écran A1 est bien placé **(58% des réponses)**
- La position de l'écran A2 est à revoir **(55% des réponses)**
- Le signal sonore n'est pas assez informatif "Bip, ça ne veut pas dire grand chose" **(33% des réponses)**

L'interface visuelle est à revoir, les virages alternent trop vite **(9% des**

➤ **réponses)**

• **Quelles modifications souhaiteriez vous apporter à ces interfaces ?**

- Mettre l'interface visuelle en position A1 (**66% des conducteurs** ayant eu la condition A2) :
- Ajouter une interface visuelle dans la condition "haptique seul" (**50% des conducteurs** ayant eu cette condition)
- Revoir les interfaces visuelles (**26% des conducteurs**)
- Le signal sonore jugé un peu agressif, stressant (**20% des conducteurs**)
- Le système devrait ralentir le véhicule si on arrive trop vite et qu'on n'a pas réagi (**8% des conducteurs**)

• **Durant votre expérience passée de conduite, avez-vous déjà été confronté à une situation où le système "Curve warning" vous aurait été utile ?**

Non (21,6%)	Oui (78,4%)*
-------------	--------------

• **Si oui, laquelle ?**

- Arrivée trop rapide sur un **virage (66% des réponses)**
- **Route inconnue (58% des réponses)**
- Route mouillée, verglas (**15% des réponses**)
- Faible visibilité (nuit, brouillard) (**14% des réponses**)
- Sortie d'autoroute ou en fin d'une grande ligne droite (**9% des réponses**)
- Vitesse excessive sur route connue (**8% des réponses**)
- Inattention, baisse de vigilance (**5% des réponses**)

• **Nous pouvons installer ce système sur votre véhicule personnel. Êtes-vous prêts à l'essayer pendant un mois ?**

Non (3,8%)	Oui (96,3%)*
------------	--------------

• **Pensez-vous que c'est un système indispensable en série ?**

Pas du tout (10,8%)	Un peu (13,3%)	Moyennement (22,9%)	Plutôt (44,6%)*	Absolument (8,4%)
------------------------	-------------------	------------------------	----------------------------	----------------------

4.2.3.2 Conclusion

Même si le Time Warning a été mieux perçu que le Curve Warning (cf. les notes obtenues aux questions concernant l'utilité, les interfaces, etc.), les données montrent une certaine acceptabilité et utilité du système Curve Warning. Son objectif est compris et le Curve Warning est jugé utile par au moins 70% des conducteurs qui estiment qu'un tel système aurait pu les aider par le passé, lors, par exemple, d'une arrivée trop rapide sur virage. Cette situation est celle la plus souvent rencontrée, surtout sur une route inconnue. Le parcours sur lequel a été réalisée l'expérimentation était représentatif de ces situations puisque 40% des conducteurs ont été surpris par certains virages, virages que nous avons préalablement identifiés comme potentiellement surprenants car leur rayon de courbure diminuait pendant le virage. L'efficacité du système doit cependant être améliorée car celui-ci n'a pas permis de suffisamment prévenir les conducteurs de la dangerosité des virages concernés pour leur éviter d'être surpris. De plus, la version évaluée doit être améliorée avant de procéder à une évaluation plus représentative de ce que serait ce système s'il était un jour commercialisé car le taux de non fonctionnement du système est pour le moment trop important (il n'a pas fonctionné pour 10% des conducteurs). La fiabilité, tout comme l'efficacité du système, doivent donc être améliorées.

Concernant les interfaces, elles sont dans l'ensemble bien jugées et les notes attribuées aux modalités visuelle, sonore et haptique sont homogènes. Le sonore se démarque cependant quant à sa facilité de perception. Il est très facilement perçu mais les conducteurs le jugent surtout très intrusif. Concernant la modalité visuelle, l'affichage des icônes en « bas de pare-brise »(zone A1) génère de meilleurs résultats par rapport à un affichage sur le tableau de bord (zone A2). Les icônes y sont plus facilement perçues : 80% des conducteurs jugent les icônes facilement perçues en zone A1(dont 36% qui les jugent très facilement perçues) contre 53,3% en zone A2 (dont seulement 20% qui les jugent très facilement perçues). De plus, l'affichage dans la zone A1 est demandé par la majorité des conducteurs ayant eu un affichage en zone A2. Les icônes étaient comprises mais étaient gênantes lors d'enchaînements de virages car elles se succédaient très rapidement. Quant aux interfaces haptiques, 25% des conducteurs n'ont pas ressenti le retour de force dans

la pédale d'accélérateur, surtout dans le groupe « haptique seul ». Rappelons que pour l'évaluation du Curve Warning, l'existence de cette pédale active n'était pas signalée aux conducteurs. Ces derniers ressentaient parfois « quelque chose de bizarre » dans le pied mais ne l'associait pas forcément à une interface du système. En revanche, une fois qu'ils avaient compris le principe de la pédale active, elle était bien acceptée. Ainsi, les interfaces haptiques peuvent être des moyens adaptés et efficaces pour prévenir les conducteurs d'un danger potentiel, mais elles nécessitent une explication préalable.

4.2.4 Conclusion concernant les interfaces innovantes

Les différentes appréciations associées aux interfaces haptiques pour le Time Warning et le Curve Warning sont résumées dans le tableau 4.7.

Appréciations des interfaces haptiques	Associées au Time Warning			Associées au Curve Warning		
	Notes et pourcentages	Moyenne	Bonnes	Très Bonnes	Moyenne	Bonnes
Explicites	4,37	32,2%	55,9%	3,8	37,5%	32,5%
Adaptée	4,41	30,5%	57,6%	4,05	40%	37,5%
Facilement perçue	4,58	23,7%	67,8%	4,03	37,5%	37,5%

TAB. 4.7 – Appréciations des interfaces haptiques par les conducteurs en fonction des systèmes auxquels elles sont associées.

Alors que la pédale d'accélérateur active est particulièrement adaptée au Time Warning, les résultats sont plus mitigés pour son application au Curve Warning. Cela peut s'expliquer par des contextes de conduite différents lorsque les systèmes se déclenchent. Lorsque le Curve Warning se déclenche, le conducteur est souvent en train de ralentir. Sa vitesse n'est pas adaptée au virage suivant mais il a déjà relevé le pied de la pédale d'accélérateur. En revanche, lorsque le Time Warning se déclenche, il n'y a généralement pas de décélération en cours, le conducteur est en train d'accélérer ou de maintenir sa vitesse. Il a donc le plus souvent le pied sur l'accélérateur. Une interface sous forme d'un retour de force ou de vibrations dans la pédale d'accélérateur est donc bien appropriée au Time Warning alors qu'elle l'est moins pour le Curve Warning. Les interfaces haptiques ne doivent pas pour autant être écartées des interfaces possibles de ce dernier système

mais au contraire, elles doivent être mieux adaptées à son contexte de déclenchement. Par exemple, il serait possible de prévenir le conducteur que sa vitesse n'est pas adaptée au virage suivant par une interface haptique (comme des vibrations) implantée dans le volant. Pour conclure, les interfaces haptiques représentent bien une solution alternative aux interfaces classiquement utilisées et sont pertinentes pour les systèmes étudiés dans le cadre de cette thèse. Cependant, il est nécessaire de les adapter aux contextes de déclenchement de chaque système et d'expliquer préalablement aux conducteurs leur fonctionnement. Concernant les interfaces visuelles, les différentes appréciations associées aux icônes affichées en zone « bas de pare-brise »(A1) ou sur le tableau de bord (A2) pour le Time Warning et le Curve Warning sont résumées dans le tableau 4.8.

Appréciations des interfaces visuelles		Associées au Time Warning			Associées au Curve Warning		
		Moyenne	Bonnes	Très Bonnes	Moyenne	Bonnes	Très Bonnes
Notes et pourcentages							
Explicites	A2	4,3	43,3%	43,3%	4,2	46,7%	40%
Explicite	A1	4,1	48,4%	32%	4,1	36%	44%
Adaptées	A2	4,1	33,3%	40%	4	60%	23,3%
Adaptées	A1	4,1	45,2%	38,7%	4,1	52%	32%
Facilement perçues	A2	3,7	40,7%	22,2%	3,3	33,3%	20%
Facilement perçues	A1	4,2	38,7%	41,9%	4	44%	36%

TAB. 4.8 – Appréciations des interfaces visuelles par les conducteurs en fonction des systèmes auxquels elles sont associées

Contrairement aux interfaces haptiques, les interfaces visuelles ont été évaluées de façon relativement similaire, qu'elles soient associées au Time Warning ou au Curve Warning. Dans les deux cas, la présentation des icônes visuelles dans la zone « bas de pare-brise »(A1) est plus facilement perçue que sur le tableau de bord (A2). Ceci est toutefois accentué pour le Curve Warning puisque seul un conducteur sur deux juge que les icônes présentées sur le tableau de bord sont facilement perçues. Le volant les masquait en effet dès lors qu'il était tourné, ce qui était relativement fréquent vu la typologie de la route. Ainsi, que ce soit pour éviter des effets de masque ou pour limiter le détournement du regard de la route, la présentation des icônes visuelles en « bas de pare-brise » correspond davantage aux exigences des systèmes étudiés. Différentes technologies d'affichage dans cette zone sont possibles, nous avons, dans le cadre de cette thèse, comparé deux d'entre

elles.

4.3 Comparaison de deux technologies possibles pour l’affichage des interfaces visuelles en bas de pare-brise

Comme nous l’avons vu précédemment, une présentation des informations visuelles en bas de pare-brise permet d’améliorer la sécurité des usagers et l’efficacité des systèmes d’aide à la gestion des situations critiques. Deux technologies d’affichage dans cette zone sont aujourd’hui envisageables. Soit les informations visuelles s’affichent sur un écran LCD, placé sur le dessus de la planche de bord, soit les informations sont projetées sur le pare-brise via la technologie HUD¹⁰. L’avantage théorique de la technologie HUD est qu’aucune accommodation visuelle n’est nécessaire, contrairement à l’écran. Cependant, cette solution est beaucoup plus chère. Un des objectifs de cette évaluation était notamment de vérifier que l’apport de la technologie HUD méritait cet écart de coût. Il était intéressant de savoir quelles étaient les autres informations qu’il serait pertinent de présenter dans cette zone « bas de pare-brise ». Différents icônes concernant d’autres systèmes d’aide comme l’aide à la navigation ainsi que les alertes véhicule classiques ont été évaluées. Une nouvelle zone d’affichage dans le véhicule est très prisée par les différents concepteurs, certains souhaitant par exemple y afficher le tableau de bord complet. Cependant, cette zone est dans l’axe du regard du conducteur et toute information présente dans cette zone attire son attention. Or, il est essentiel de ne pas le distraire par des informations certes utiles dans l’absolu, mais pas directement utiles et utilisables pour l’activité de conduite en cours. Si trop d’informations sont présentes dans cette zone, elle sera saturée et les informations d’urgence risquent de ne pas être perçues. Il a donc fallu tester les différentes informations visuelles présentes dans le véhicule et déterminer quelles étaient celles pertinentes pour une telle zone.

¹⁰Head Up Display : système de lecture « tête haute » projetant les informations nécessaires à la conduite du véhicules sur le pare-brise, dans le champ de vision direct du conducteur.

Ainsi, outre l'évaluation de deux solutions d'affichage possibles pour la zone « bas de pare-brise »(une solution HUD versus une solution d'affichage sur un écran LCD), différentes icônes visuelles envisagées ont été évaluées. Pour cela, un véhicule équipé des deux modalités d'affichage « bas de pare-brise »(HUD versus écran LCD) a été mis à notre disposition. Concernant l'affichage HUD, la source lumineuse utilisée est une unité d'éclairage de conception nouvelle. Une lumière blanche, de très haute intensité (500 000 candelas/m²), est émise grâce à un réflecteur équipé d'un transistor à matrice active (écran TFT) sur lequel sont composées en 65 000 points les images en couleurs. Les rayons lumineux sont relayés par plusieurs miroirs permettant de compenser la courbure de la vitre. L'un des miroirs peut pivoter, afin que le conducteur puisse régler la hauteur des images projetées. En combinant une unité d'éclairage à grande luminosité à un afficheur TFT, on obtient un affichage « tête haute »supérieur aux systèmes monochromes conventionnels en termes de possibilités de représentation graphique et ce, quelles que soient les conditions de luminosité extérieures (fort rayonnement solaire ou obscurité) : un capteur mesure en continu la clarté du milieu ambiant, la luminosité des diodes s'adapte automatiquement et peut être atténuée au millième, sans décalage de couleur. En outre, un traitement particulier a été effectué sur la pare-brise afin d'améliorer la qualité de l'affichage. Ce traitement n'affectait en rien la perception visuelle de la route.



FIG. 4.20 – Exemples d'affichage du HUD

Le véhicule était également équipé d'un boîtier permettant d'afficher les icônes visuelles, en mode manuel ou automatique, sur l'écran ou en HUD. De plus, des commandes au volant permettaient de piloter ces affichages. En revanche, comme le véhicule nous a été prêté par le concepteur de ces deux systèmes, aucune modification ne pouvait y être effec-

tuée. Nous avons donc dû concevoir notre protocole d'évaluation en fonction de contraintes temporelles fortes et sans pouvoir intégrer toutes les mesures que nous souhaitions. La mesure de la réponse électrodermale par exemple nécessitait un protocole trop lourd pour pouvoir être utilisée. Nous avons tout de même pu mesurer des temps de réponse, mesure de performance pertinente pour une comparaison de deux modes d'affichage associés à des situations d'urgence. Nous avons recueilli l'avis subjectif de 24 conducteurs mais également l'avis de huit experts en facteurs humains.

Notre évaluation a eu lieu en deux temps : une expérimentation menée sur piste avec des conducteurs, puis des évaluations « longue durée », en conduite réelle, réalisées par des experts en facteurs humains.

4.3.1 Évaluation sur piste

4.3.1.1 Principes et méthodes de l'étude

Vingt-quatre conducteurs ont participé à cette première étude qui comprenait une tâche de détection durant la conduite. Pour des raisons de sécurité, cette première phase a été réalisée sur piste. Lors de la conduite, des icônes concernant deux types d'alertes (des alertes liées à une défaillance du véhicule et des alertes liées à l'environnement) étaient présentées aux conducteurs en zone « bas de pare-brise », avec l'un puis l'autre des systèmes d'affichage (HUD versus écran LCD), l'ordre des systèmes étant contrebalancé.

Le conducteur avait comme consigne d'appuyer sur une touche « d'acquiescement » placée sur le volant dès qu'il était capable de classer l'alerte (alerte véhicule versus alerte environnement). Cet appui faisait disparaître l'alerte. Nous lui demandions alors de nous dire dans quelle catégorie prédéfinie il classait l'icône. Nous avons mesuré le temps de réponse entre l'affichage de l'alerte et « l'acquiescement » de cette dernière, ainsi que le nombre d'erreurs de classification. Enfin, nous avons recueilli l'avis des conducteurs sur ces deux affichages par le biais d'un questionnaire.

Durant ces expérimentations, outre la technologie d'affichage (écran LCD versus HUD), deux configurations d'affichage ont été testées : soit la zone d'affichage était réservée exclusivement aux alertes, soit la zone d'affichage était partagée entre un affichage permanent

de la vitesse et l'affichage des alertes (voir schémas ci-dessous). Tous les conducteurs testaient les quatre configurations dont l'ordre était contrebalancé. Enfin, un signal sonore (bip sonore) était associé à l'affichage des alertes pour la moitié des conducteurs.

4.3.1.2 Variables de l'étude

4.3.1.2.1 Les variables indépendantes

1. La technologie d'affichage :

- Une technologie d'affichage HUD
- Une technologie d'affichage LCD

2. Le contenu des affichages :

- Une zone d'affichage réservée exclusivement aux alertes (figure 4.21)



FIG. 4.21 – Zone d'affichage réservée aux alertes

- Une zone d'affichage partagée entre un affichage permanent de la vitesse et l'affichage des alertes (figure 4.22)



FIG. 4.22 – Zone d'affichage partagée

3. Une seconde modalité sensorielle associée (de type bip sonore)

- Un signal sonore associé à l'affichage des alertes pour la moitié des conducteurs
- Interface visuelle seule pour l'autre moitié

4.3.1.2.2 Les variables dépendantes

- Le temps de réponse (en seconde) correspondant au délai entre l’affichage de l’alerte et l’appui sur le bouton d’acquiescement
- Le nombre d’erreurs dans la classification des alertes
- Les réponses des conducteurs au questionnaire passé à la fin de l’essai.

4.3.1.3 Résultats de l’expérimentation sur piste

Le traitement des données a montré qu’aucune erreur de classification n’a été commise par les conducteurs. Ces derniers avaient donc bien perçu l’alerte visuelle présentée avant d’appuyer sur la touche d’acquiescement, puisqu’ils étaient toujours capables de dire de quel type d’alerte il s’agissait. Rappelons qu’une fois qu’ils avaient appuyé sur le bouton d’acquiescement, l’alerte affichée disparaissait. Les résultats concernant les temps de réponse et les réponses au questionnaire sont présentés ci-dessous. La significativité des résultats obtenus concernant les temps de réponse a été évaluée par le biais de t de Student.

4.3.1.3.1 Temps de réponse associés à la technologie d’affichage (figure 4.23)

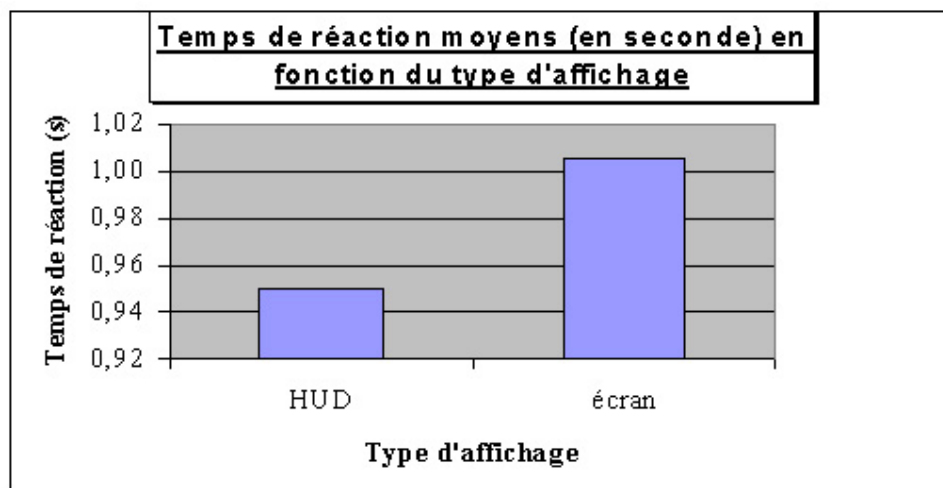
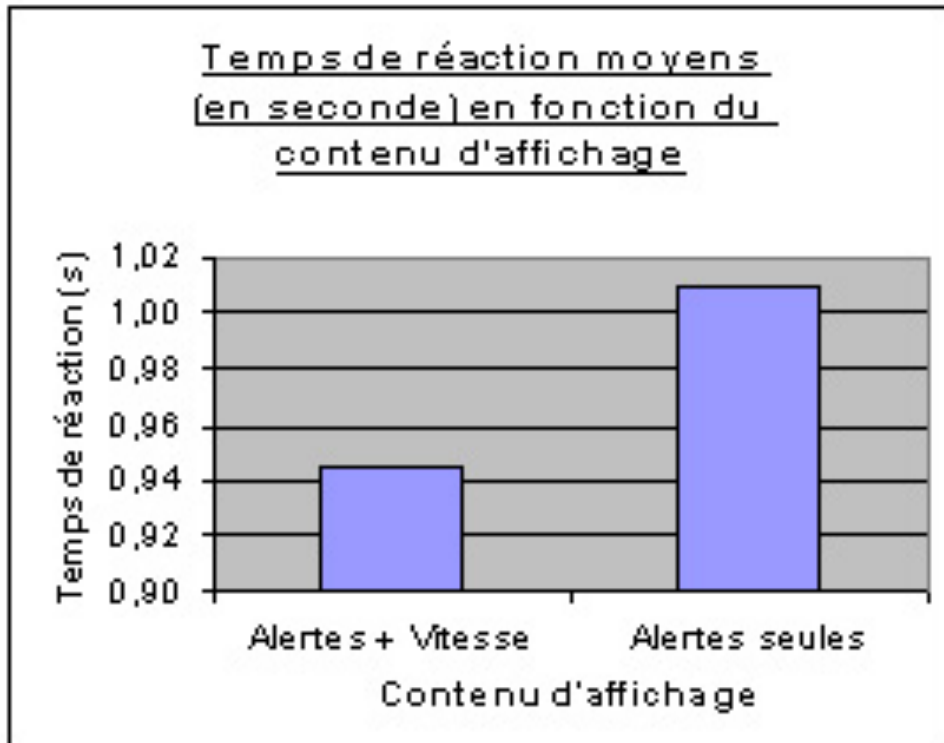


FIG. 4.23 – Temps de réponse associés à la technologie d’affichage

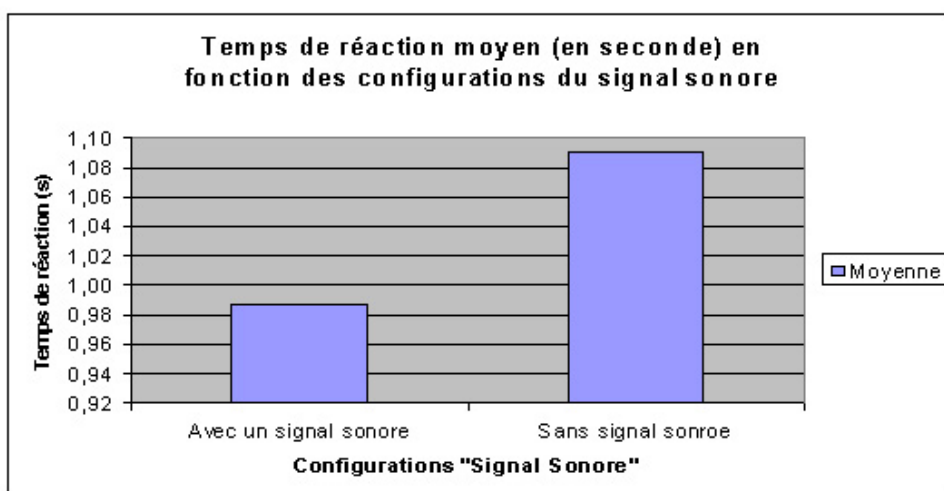
Un affichage HUD entraîne un temps de réponse à une alerte significativement plus court qu’un affichage sur écran LCD « bas de pare-brise » ($p=0,04$).

4.3.1.3.2 Temps de réponse associés au contenu d’affichage (figure page 231)



L'affichage permanent de la vitesse dans la zone testée entraîne un temps de réponse à une alerte significativement plus court ($p=0,01$) qu'un affichage réservé uniquement aux alertes, surtout en affichage HUD ($p=0,0015$).

4.3.1.3.3 Temps de réponse associés à la seconde modalité sensorielle (bip sonore) (figure page 231)



Le signal sonore associé à l'affichage d'une alerte entraîne un temps de réponse à une alerte significativement plus court qu'une alerte présentée seule ($p<0,001$).

4.3.1.3.4 Résultats concernant l'évaluation subjective

Suite à l'analyse des réponses des conducteurs au questionnaire, il apparaît que 80 % d'entre eux préfèrent l'affichage des informations sur le HUD à l'affichage des informations sur l'écran. Ils préfèrent également l'affichage permanent de la vitesse en HUD plutôt qu'un HUD exclusivement dédié aux alertes. Enfin, la majorité de ces conducteurs souhaite comme informations visuelles en « bas de pare-brise », via la technologie HUD, l'affichage des alertes, de la vitesse et des vignettes associées à l'aide à la navigation.

4.3.1.3.5 Récapitulatif des résultats de l'expérimentation sur piste

- Les trois facteurs jouent sur les temps de réponse des conducteurs :
 - La technologie d'affichage : temps de réponse [HUD] < temps de réponse [LCD]
 - Le contenu d'affichage : - temps de réponse [Vitesse + Alerte] < temps de réponse [alerte seule]
 - Le signal sonore associé : temps de réponse [Sonore associé] < temps de réponse [alerte visuelle seule]
- L'évaluation subjective des conducteurs corrobore ces résultats : la majorité des conducteurs préfèrent l'affichage des informations sur le HUD, avec l'affichage permanent de la vitesse et un signal sonore associé.
- Les alertes, la vitesse et les vignettes de guidage associées à la navigation sont les informations les plus fréquemment souhaitées par les conducteurs en HUD.

4.3.2 Évaluations « longue durée » en conduite réelle

4.3.2.1 Principes et méthodes de l'étude

Après avoir recueilli les données objectives concernant les temps de réponse associés aux différentes technologies possibles ainsi que l'avis de conducteurs, nous avons pensé qu'il serait intéressant de comparer ces résultats aux avis d'experts en facteurs humains. Pour ce faire, nous avons prêté le véhicule à huit experts en leur demandant d'évaluer les deux technologies, dans différentes conditions. Le véhicule équipé du HUD et de l'écran LCD a donc été prêté à 8 experts en facteurs humains, pendant une durée moyenne de

conduite réelle cumulée d'environ 3 heures. Les points de vue des conducteurs ont été recueillis par questionnaire à l'issue de la phase de conduite. Plusieurs configurations d'affichage ont été évaluées (vitesse, vignettes de guidages, alertes), dans différents contextes de conduite (jour, nuit, ville, autoroute, etc.)

4.3.2.2 Résultats des évaluations « longue durée »

Les experts recommandent la présentation d'informations visuelles via la technologie HUD plutôt que sur l'écran LCD. Il y a cependant certains points à améliorer techniquement sur la version du système HUD testé. Tout d'abord, certaines couleurs sont mal perçues ou fatigantes visuellement en HUD (ex : bleu) alors qu'elles sont bien perçues sur un tableau de bord classique. Lors de la conduite de nuit, les feux arrière des voitures précédentes peuvent perturber la lisibilité des informations présentées en HUD. Enfin, le réglage de la hauteur du HUD ne couvre pas encore toute la population des conducteurs et les informations présentées sur le HUD peuvent être floues lorsque le conducteur porte des lunettes à verres progressifs.

Concernant l'affichage de la vitesse, des vignettes de navigation et des alertes, les avis des experts sont présentés ci-dessous :

4.3.2.2.1 Point de vue sur la vitesse

Malgré une gêne perçue au début de l'évaluation, l'affichage de la vitesse en HUD présente un réel intérêt. L'affichage de la vitesse en HUD faciliterait la consultation et la régulation de la vitesse (ex : sur autoroute, de nuit). Cependant, le client devrait avoir le choix de l'afficher ou non.

4.3.2.2.2 Point de vue sur la navigation

Malgré un contenu des vignettes à revoir, les vignettes de guidage sont préconisées en HUD par une grande majorité des experts. Il s'agirait de présenter uniquement les flèches de guidage, peu de temps avant le changement de direction. Il ne s'agirait pas de laisser une flèche signifiant « Continuer tout droit » pendant des kilomètres.

4.3.2.2.3 Point de vue sur les alertes

Selon ces experts, l'affichage des alertes est préconisé en HUD, mais ce type d'affichage ne devrait pas être réservé aux alertes. Tout comme le montraient les résultats issus de la première phase d'étude, la perception de ces dernières apparaît être favorisée par l'affichage d'une information permanente (ex : vitesse) à consulter régulièrement.

4.3.3 Conclusion de l'étude

Cette étude a montré que la technologie HUD était plus performante et mieux acceptée que l'écran LCD car, contrairement à l'écran, elle permet d'afficher des informations visuelles dans l'axe du regard, sans pour autant masquer une partie du champ de vision, ni nécessiter une accommodation visuelle du conducteur. L'objectif de présenter une information visuelle au conducteur sans pour autant l'obliger à quitter la route des yeux est en partie résolu car ce dernier peut voir la route, au travers de l'interface visuelle présentée.

Les experts en facteurs humains tout comme les conducteurs interrogés, ont trouvé l'affichage en HUD plus adapté, ce que confirme les mesures objectives. Les temps de réponse moyens associés à l'affichage HUD sont significativement plus bas d'au moins 0,5 seconde que ceux associés à l'écran LCD. Ce gain peut paraître faible, mais faut-il rappeler que dans des situations critiques, chaque gain de temps est précieux et qu'en 0,5 seconde, à 90 Km/h, le véhicule parcourt 12,5 mètres et 18 mètres à 130 Km/h, soit l'équivalent de 3 voitures.

Par ailleurs, la comparaison concernait deux possibilités d'affichage en « bas de pare-brise ». La technologie HUD entraîne des temps de réponse plus courts que l'écran LCD, mais qui lui même entraîne des temps de réponse plus courts que ceux associés à une présentation sur un tableau de bord classique. L'affichage en « bas de pare-brise » est déjà un plus, mais il est optimisé grâce à une présentation utilisant le HUD.

Rappelons cependant que cette étude avait pour objectif d'évaluer l'apport possible de la technologie HUD par rapport à un écran LCD. C'était une étude « exploratoire » qui n'avait pas la prétention de résoudre tous les problèmes associés à de telles technologies. Nous voulions savoir si le HUD était une solution envisageable et le cas échéant faire une

première évaluation de ces avantages et inconvénients. Il est évident que d'autres études devront être conduites afin de mettre en évidence toutes les contraintes dont il faut tenir compte pour obtenir une interface « tête haute » particulièrement adaptée à la conduite automobile et mettre en évidence les modifications que cette technologie engendrera.

Ainsi, la présentation d'informations via le HUD doit être particulièrement étudiée avant d'être implantée car les recommandations associées aux couleurs présentées sur écran ne s'appliquent pas complètement à cette nouvelle technologie. Par exemple, les icônes qui avaient été créées sur écran d'ordinateur ne ressortent pas du tout de la même façon sur HUD. Les contrastes doivent être optimisés, en intégrant les contraintes associées à l'environnement de conduite (forte luminosité, nuit, brouillard, etc.). Les concepteurs d'interfaces doivent pouvoir travailler directement sur un outil de conception permettant de refléter ces contraintes ; or un tel outil n'est pas encore mis en place. L'introduction de la technologie HUD dans les véhicules modifiera certainement l'activité de conduite mais également l'activité de conception des informations visuelles qui y seront présentées. De telles modifications devront bien évidemment être anticipées et accompagnées.

4.4 Conclusion du chapitre

La réalisation des évaluations sur route ouverte, dans des conditions de conduite réelles, apporte un réalisme nécessaire à l'obtention de résultats représentatifs des futures conditions d'utilisation des systèmes évalués. Même si le véhicule expérimental n'est pas le véhicule personnel du sujet, nous nous sommes efforcés de recruter les conducteurs parmi ceux qui possédaient un véhicule similaire. De même, les caméras étaient placées de façon à être les plus discrètes possibles et le matériel nécessaire à l'enregistrement des données étaient positionné dans le coffre du véhicule. Enfin, la durée relativement longue des évaluations a permis aux conducteurs de s'habituer au véhicule et au contexte expérimental. Nous pensons que les résultats obtenus sont représentatifs des comportements des conducteurs. La présence d'un groupe contrôle dans ce contexte est importante car elle permet de vérifier que les résultats obtenus sont bien liés au système et non aux caractéristiques intrinsèques des groupes. Par exemple, l'absence de différence significative entre le groupe

contrôle et les groupes « tests » sur la portion « contrôle » de l'évaluation du Time Warning confirme que les différences observées sur la « portion test » sont dues à l'activation du système.

Par ailleurs, lors d'expérimentations sur route, il est difficile d'obtenir des conditions de passation similaires pour les différents groupes. Le trafic, les conditions climatiques, les incidents techniques (crevaison, problème d'enregistrement, etc.) ne peuvent pas être contrôlés a priori. Il est donc important d'en tenir compte dès la construction du protocole expérimental et de prévoir des journées et des conducteurs supplémentaires pour palier d'éventuels problèmes. Ainsi, lors de la construction du protocole de passation, nous avons prévu plusieurs heures de passations, identiques pour chacun des groupes. Ensuite, lors de la phase expérimentale, nous avons vérifié que les conditions de trafic étaient sensiblement les mêmes dans les différents groupes et lorsque les conditions climatiques étaient trop dégradées, nous avons choisi de reporter les sujets de la journée. Ainsi, pour obtenir 81 conducteurs dont les conditions de passation étaient sensiblement les mêmes, 92 conducteurs ont évalué le Time Warning. Lorsqu'on réalise une expérimentation sur route, une certaine souplesse est donc nécessaire.

Les différentes données enregistrées sont cohérentes et leur complémentarité permet une analyse et une interprétation plus fines des résultats. L'avis subjectif des conducteurs, même si des biais peuvent exister, est une donnée facilement obtenue et pertinente pour l'évaluation de différents systèmes et de leurs interfaces. Les réponses obtenues lors d'entretiens permettent d'avoir rapidement et facilement un avis sur un système, sans devoir effectuer un traitement trop lourd des données. Ainsi, nous avons pu, dès la première version des systèmes, mettre en évidence les points posant problème et valider certaines solutions. Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse des réponses électrodermales permet de mesurer le délai de perception d'une alerte et son impact sur la charge attentionnelle des conducteurs. Cependant, elle doit absolument être complétée par l'analyse d'autres types de mesure afin de s'assurer de la cohérence des résultats et de la justesse de notre interprétation. Par ailleurs, une perte importante de données est à prévoir, perte souvent liée à une mauvaise qualité du signal enregistré (électrodes mal positionnées, défauts

de capteurs, mauvaise conduction de la peau, etc.). De plus, pour obtenir des résultats significatifs, un nombre important de réponses par sujet est requis. Enfin, concernant les mesures de performance comme le temps de suivi ou les temps de réponse, les résultats issus de ces données sont représentatifs de l'efficacité d'un système et de son impact sur la conduite des sujets. La combinaison de ces différentes mesures est donc appropriée à une évaluation fine d'un système et l'obtention de nombreuses données chiffrées permet de réaliser des analyses statistiques et de vérifier la significativité des résultats obtenus.

La méthodologie mise au point tout au long de cette thèse nous a permis d'évaluer dans ce chapitre deux systèmes d'aide ainsi que différentes interfaces possibles. Le Time Warning et le Curve Warning sont des systèmes d'aide à la conduite qui se sont avérés utiles et efficaces, même si certaines améliorations doivent encore leur être apportées (surtout pour le Curve Warning). Ils nécessitaient des interfaces particulièrement adaptées à des situations de conduite critiques. Les résultats ont montré que la pédale d'accélérateur active est particulièrement adaptée au Time Warning et apporte une sécurité et un confort supplémentaires par rapport aux interfaces classiques. Cependant, pour être réellement efficaces, les interfaces haptiques nécessitent d'être expliquées aux conducteurs car elles peuvent ne pas être perçues et comprises intuitivement. L'association d'icônes visuelles aux interfaces haptiques, au moins lors de la prise en main du système, semble faciliter l'apprentissage et la compréhension de son fonctionnement. Il faut cependant qu'elles soient bien positionnées pour ne pas perdre les bénéfices apportés par les interfaces haptiques. L'affichage des icônes visuelles dans la zone « bas de pare-brise » est donc préférable à un affichage classique sur le tableau de bord et la technique HUD améliore encore cette sécurité. Les interfaces innovantes mises au point pour les deux systèmes d'aide à la gestion de situations accidentogènes répondent en grande partie aux contraintes associées à ces contextes de conduite particuliers.

Chapitre 5

Discussion générale

5.1 Récapitulatif de la problématique

L'objectif de cette thèse était d'évaluer certains futurs systèmes d'aide à la conduite automobile, associés à des situations critiques, fortement accidentogènes. Outre la mise au point des caractéristiques techniques et de fonctionnement de ces systèmes, notre action a été de mettre au point et d'évaluer les interfaces qui devaient être associées à ces situations. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, ces interfaces doivent être particulièrement adaptées à des situations de conduite critiques où le partage de l'attention, entre différentes sources et entre différentes tâches, est au cœur du problème. Ainsi, au vu des limites des interfaces classiquement utilisées dans l'automobile (icônes visuelles sur le tableau de bord associées parfois à un bip sonore), la mise au point d'interfaces innovantes a été nécessaire. Une présentation d'informations visuelles sur le tableau de bord détourne le regard du conducteur de la route alors que toute son attention devrait s'y trouver. Il s'agissait alors de concevoir des interfaces qui limiteraient ce détournement d'attention. Une première amélioration possible était d'afficher les icônes visuelles au plus près de l'axe du regard du conducteur, via, par exemple, un affichage « tête haute » (Head Up Display). Par ailleurs, la modalité haptique et plus particulièrement la pédale d'accélérateur active, était une piste intéressante à explorer puisque ce type d'interfaces semblait permettre de prévenir le conducteur d'un danger, sans détournement de regard et en agissant directement sur le moyen d'action du conducteur (le pied).

Cependant, une évaluation de telles interfaces nécessitait une méthodologie fiable et adaptée. Comme il existe une multitude d'indicateurs et de méthodes, une étude attentive de la littérature a été nécessaire afin de déterminer ceux et celles qui étaient les mieux adaptés à une évaluation des systèmes étudiés et de leurs interfaces (voir chapitre 2). Après avoir évalué expérimentalement les indicateurs et les méthodes qui semblaient adaptés à notre problématique (voir chapitre 3), nous les avons appliqués à l'évaluation de deux systèmes d'aide (le Time Warning et le Curve Warning) et plus particulièrement à leurs interfaces qui pouvaient être de différente nature (visuelle, sonore ou haptique). Enfin, concernant les interfaces visuelles possibles, deux solutions d'affichage dans la zone A1 ont été évaluées. Dans ce chapitre, nous ferons le bilan de ces différents points, en abordant tout d'abord la mise au point de la méthodologie d'évaluation, puis celles des interfaces avant de discuter les résultats issus de leurs applications à l'évaluation des systèmes d'aide étudiés et de leurs interfaces. Pour conclure, nous aborderons les perspectives offertes aux systèmes et aux interfaces évalués au sein de Renault.

5.2 Récapitulatif de la mise au point d'une méthodologie

Lors de cette thèse, trois contextes expérimentaux ont été évalués : la piste, le simulateur de conduite et la route « ouverte ». Notre vision à ce stade est que ces moyens ne doivent pas être mis en opposition mais être plutôt perçus comme des moyens mis à notre disposition pour réaliser des évaluations à différentes phases de conception d'un système d'aide. Au début de sa conception et de la définition du cahier des charges, une étude sur simulateur, comme celle réalisée dans le chapitre 3 sur la pertinence d'un système d'aide à la gestion de sorties de voies, permet de tester l'utilité d'un tel système, sa faisabilité et d'identifier les différentes contraintes qui sont associées à son utilisation. Le simulateur permet de mettre les conducteurs et les passagers dans des situations critiques de conduite, sans aucun danger et d'évaluer différentes maquettes possibles. Les conditions expérimentales sont répétables, autant de fois que nécessaire. Le réalisme du contexte de

conduite peut cependant fortement varier d'un simulateur à un autre. La piste peut quant à elle permettre de tester différentes solutions, dans un contexte relativement bien répertable et en limitant les risques pour les conducteurs. L'utilisation d'une double tâche par exemple peut se faire à moindre risque que sur la route et avec un réalisme plus important que sur simulateur. Ce contexte expérimental nous a permis d'évaluer par une mesure de performance deux solutions d'affichage dans la zone bas de pare-brise (A1), rapidement et sans mettre en danger. Par ailleurs, pour un constructeur automobile, c'est un moyen de faire des évaluations tout en assurant la confidentialité du prototype testé. Enfin, si le simulateur et la piste permettent de réaliser des évaluations en amont du projet de conception, sur des versions non-finalisées, la conduite sur route « ouverte » nécessite que la mise au point du système soit suffisamment avancée pour garantir la sécurité des conducteurs et des autres usagers de la route. Cependant, elle permet de se rapprocher le plus possible de la future situation d'utilisation du système et de mettre en évidence des points critiques que seule l'activité réelle de conduite peut révéler. Elle me semble donc, à ce titre, nécessaire avant la phase de commercialisation d'un système.

Second constat d'ordre méthodologique, les mesures utilisées dans le cadre de cette thèse sont de nature différente et se complètent bien. Cette complémentarité est très importante car les résultats de ces différents indicateurs peuvent sembler à première vue contradictoires alors qu'ils ne mesurent pas la même chose. Il est donc important d'utiliser des indicateurs issus de mesures différentes. Par exemple, pour le Time Warning, les interfaces haptiques sont meilleures que celles visuelles du point de vue de la réponse électrodermale et des questionnaires, alors que des résultats inverses sont obtenus à partir de l'analyse des temps de suivi. En réalité, les mesures visuelles sont certainement plus efficaces, mais cette efficacité se paye par une plus forte intrusivité. La réponse électrodermale permet de mettre en exergue cette intrusivité et de nuancer les résultats obtenus par les mesures de performances. A l'inverse, bien que les mesures physiologiques aient mis en évidence la faible intrusivité des interfaces « Haptique + Sonore », celle-ci s'est finalement révélée excessive au vue des résultats issus des entretiens et des temps de suivi : le système n'avait pas d'effet sur le comportement du conducteur, faute d'une bonne perception et

interprétation de ces interfaces.

Enfin, nous avons pu établir que les questionnaires ou les entretiens sont des mesures particulièrement utiles dans le cadre des systèmes d'aide étudiés. Ils permettent, en effet, de mesurer l'acceptation d'un système par les utilisateurs et son utilité perçue. Les mesures objectives permettent certes d'évaluer l'efficacité (via les mesures de performances) et l'intrusivité (via les mesures physiologiques) d'un système. Mais, si d'un point de vue subjectif (celui de l'utilisateur), l'utilité du système est perçue comme nulle, alors, le système sera jugé trop intrusif. Prenons l'exemple du Time Warning. Le respect d'un temps de suivi d'au moins deux secondes fait référence à une valeur théorique prouvée. Mais, si le conducteur juge ce seuil trop haut, il ne tiendra pas compte du système Time Warning, ni de ses alertes et le rejettera. On voit ainsi l'utilité des questionnaires pour la problématique particulière de ce genre de système d'aide pour valider leur acceptation par les futurs utilisateurs.

On retrouve ici un phénomène proche de celui en jeu dans l'acceptation ou le refus des règles de sécurité et de la perception du risque. Dans les deux cas, on notera l'apport majeur de l'ergonomie dans la compréhension de ces phénomènes.

5.3 Récapitulatif de la mise au point des interfaces

Comme nous l'avons vu précédemment, les interfaces innovantes évaluées (l'affichage en zone bas de pare-brise des icônes visuelles et la pédale d'accélérateur active) répondent davantage aux contraintes associées aux systèmes étudiés. Cependant, il y a un compromis à trouver entre l'efficacité et l'intrusivité de ces systèmes car ils doivent être à même d'avertir le conducteur d'un danger potentiel, voire imminent, tout en lui permettant de conserver suffisamment de ressources cognitives pour réaliser sa tâche de conduite. Le conducteur doit en effet traiter les informations du système tout en gérant les informations nécessaires à la conduite de son véhicule. De ce point de vue, les interfaces haptiques présentaient a priori un double avantage. Premièrement, le traitement des informations haptiques pourrait se faire plus rapidement que celui d'informations visuelles, puisque dans le premier cas la modalité sensorielle d'entrée est différente de celle la plus sollicitée

par la conduite automobile. Deuxièmement, la réponse serait favorisée puisque la pédale d'accélérateur active agit directement sur la modalité sensorielle de sortie, nécessaire à une réponse adaptée. Les résultats issus des données physiologiques ont montré qu'en effet ces interfaces étaient moins intrusives que les interfaces visuelles ou sonores. Elles sont bien jugées par les conducteurs, mais nécessitent une phase d'apprentissage et une explication préalable de leur fonctionnement. Cependant, les résultats issus des temps de suivi sont plus nuancés quant à l'efficacité des ces interfaces lorsqu'elles ne sont pas associées à des interfaces visuelles. Enfin, il faut qu'elles soient conçues et adaptées à chaque système. La pédale d'accélérateur active offre des résultats très prometteurs lorsqu'elle est associée au Time Warning, mais des résultats plus nuancés lorsqu'elle est associée au Curve Warning.

Concernant les interfaces visuelles, l'affichage des icônes dans la zone « bas de pare-brise » est fortement recommandé pour les systèmes étudiés dans le cadre de cette thèse. Elles améliorent l'efficacité des systèmes et sont particulièrement appréciées par les conducteurs. Cependant, elles sont intrusives et ne doivent pas être utilisées à mauvais escient. Là encore, une conception adaptée à chaque système est nécessaire. Notons que la technologie HUD est particulièrement bien adaptée aux spécificités de cet affichage. Elle permet notamment d'éviter la présence d'un écran permanent dans cette zone qui créerait un masque visuel et de s'adapter plus facilement aux contrastes lumineux par le biais de capteurs de luminosité placés dans l'habitacle. Elle limite également les phénomènes d'accommodation visuelle, ce qui est important dans des contextes critiques.

En revanche, comme nous l'avons vu précédemment, l'intégration de cette technologie d'affichage dans le véhicule a un impact fort sur le processus de conception. Par exemple, des outils de conception d'interfaces visuelles HUD doivent être élaborés et disponibles pour les personnes impliquées dans ce processus. De plus, il est essentiel de limiter le nombre et la fréquence des informations affichées dans cette zone à la fois efficace et intrusive pour, d'une part, éviter d'attirer l'attention du conducteur à mauvais escient et, d'autre part, favoriser la perception des informations utiles qui ne doivent pas être « noyées » au milieu des autres.

5.4 Perspectives pour l'entreprise

Rappelons que cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une thèse CIFRE, en partenariat avec RENAULT. Cette démarche a tout d'abord permis de mettre au point une méthodologie d'évaluation des systèmes d'aide à la conduite et de l'appliquer à des futurs systèmes en cours de conception. Cette méthodologie est bien entendu applicable à l'évaluation d'autres systèmes et elle devra être enrichie au fil de ses applications à différents systèmes.

En outre, les résultats très encourageants que nous avons obtenus concernant la pédale d'accélérateur active sont issus d'une expérimentation menée sur un grand nombre de conducteurs. Cette interface devra donc être perfectionnée pour être appliquée au Time Warning et à d'autres systèmes d'aide. De même, le HUD est une technique très prometteuse, mais qui doit encore être étudiée et améliorée. Il faudrait ainsi poursuivre l'étude de ces interfaces innovantes, sur des populations de conducteurs très diversifiées (seniors, jeunes conducteurs, hommes, femmes, etc.) et dans des contextes multiples afin de savoir les adapter aux caractéristiques extrêmement variées de la conduite automobile.

5.5 Conclusion

L'objectif de cette thèse était de comprendre les spécificités des systèmes d'aide à la gestion des situations de conduite critiques et d'identifier les interfaces qui répondraient le mieux aux exigences de ces nouveaux systèmes. Leur particularité est qu'ils interviennent dans des situations de conduite critiques mais qui ne sont pas toujours identifiées comme telles par le conducteur. La pression temporelle est forte et la perception du risque faible. Si le conducteur a perçu le danger, il a conscience de la situation et le système est inutile, voire dangereux s'il détourne l'attention du conducteur du danger à traiter. En revanche, si le conducteur n'a pas conscience du danger, toute la difficulté est de l'aider à sortir de cette situation critique, sans générer de réponse inadaptée ou d'incompréhension de sa part. Un des avantages des icônes visuelles est qu'elles sont explicites et que le conducteur perçoit la nature du problème. En revanche, les interfaces haptiques et plus particulièrement la

pédale d'accélérateur active, agissent sur le pied du conducteur, le repoussent plus ou moins fort. Le conducteur peut tout à fait lever le pied de la pédale, sans pour autant avoir compris pourquoi. La question est de savoir s'il vaut mieux privilégier une réponse adaptée mais sans réelle compréhension du problème par le conducteur ou privilégier la compréhension du problème, même si le traitement est plus long et l'interface plus intrusive.

Une fois encore, ces systèmes d'aide particuliers doivent être le fruit de différents compromis dans le choix desquels l'ergonome a un rôle majeur à jouer pour permettre une meilleure compréhension et une meilleure intégration des spécificités de chacun de ces systèmes et de ses futurs utilisateurs.

Bibliographie