



HAL
open science

Apport des études expérimentales en conduite automobile dans la mise en place d'une formation à la sécurité routière lors d'interactions avec les systèmes d'aide

Claire Petit Petit-Boulanger

► To cite this version:

Claire Petit Petit-Boulanger. Apport des études expérimentales en conduite automobile dans la mise en place d'une formation à la sécurité routière lors d'interactions avec les systèmes d'aide. Education. Université Claude Bernard - Lyon I, 2011. Français. NNT : 2011LYO10335 . tel-00863011

HAL Id: tel-00863011

<https://theses.hal.science/tel-00863011>

Submitted on 18 Sep 2013

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

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

N° d'ordre 335-2011

Année 2011

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON

Délivrée par

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD-LYON 1

Ecole Doctorale Interdisciplinaire Sciences-Santé (EDISS)

Pour l'obtention du

DIPLOME DE DOCTORAT

(Arrêté du 7 août 2006)

Mention : STAPS

(Neuroscience comportementale)

Soutenue publiquement le :

19 décembre 2011

par

Claire PETIT BOULANGER

APPORT DES ETUDES EXPERIMENTALES EN CONDUITE
AUTOMOBILE
DANS LA MISE EN PLACE D'UNE FORMATION A LA SECURITE
ROUTIERE
LORS D'INTERACTIONS AVEC LES SYSTEMES D'AIDE

Directeur de Thèse : Pr. Christian COLLET

Jury :

Gérard ACOURT, Président d'ECF

Pr Pierre DENISE - CHU de Caen- Rapporteur

Pr Jean Yves LE COZ- Arts et Métiers- ParisTech - Rapporteur

Pr Norbert NOURY- Université Claude Bernard - Lyon 1

Pr. Christian COLLET- Université Claude Bernard - Lyon 1

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université

Vice-président du Conseil d'Administration

Vice-président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire

Vice-président du Conseil Scientifique

Secrétaire Général

M. A. Bonmartin

M. le Professeur G. Annat

M. le Professeur D. Simon

M. le Professeur J-F. Mornex

M. G. Gay

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard

Directeur : M. le Professeur J. Etienne

Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles. Mérieux

Directeur : M. le Professeur F-N. Gilly

UFR d'Odontologie

Directeur : M. le Professeur D. Bourgeois

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Directeur : M. le Professeur F. Locher

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation

Directeur : M. le Professeur Y. Matillon

Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine

Directeur : M. le Professeur P. Farge

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies

Directeur : M. le Professeur F. De Marchi

Département Biologie

Directeur : M. le Professeur F. Fleury

Département Chimie Biochimie

Directeur : Mme le Professeur H. Parrot

Département GEP

Directeur : M. N. Siauve

Département Informatique

Directeur : M. le Professeur S. Akkouche

Département Mathématiques

Directeur : M. le Professeur A. Goldman

Département Mécanique

Directeur : M. le Professeur H. Ben Hadid

Département Physique

Directeur : Mme S. Fleck

Département Sciences de la Terre

Directeur : Mme le Professeur I. Daniel

UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Directeur : M. C. Collignon

Observatoire de Lyon

Directeur : M. B. Guiderdoni

Ecole Polytechnique Universitaire de Lyon 1

Directeur : M. P. Fournier

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique

Directeur : M. G. Pignault

Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1

Directeur : M. le Professeur C. Coulet

Institut de Science Financière et d'Assurances

Directeur : M. le Professeur J-C. Augros

Institut Universitaire de Formation des Maîtres

Directeur : M. R. Bernard

Apport des études expérimentales en conduite automobile dans la mise en place d'une formation
à la sécurité routière lors d'interactions avec les systèmes d'aide

La conduite automobile est l'une des rares tâches nécessitant un apprentissage et le passage d'un examen initial, qui ne prévoit pas de mise en situation critique ni l'obligation de recyclages réguliers. En conséquence, les conducteurs ne connaissent pas les nouveaux systèmes d'aide et de sécurité proposés par les constructeurs automobiles et risquent de ne pas ou de mal s'en servir en conduite nominale.

L'objectif de ce travail a été de vérifier, auprès de conducteurs novices et expérimentés, leur réelle capacité à utiliser les systèmes d'aide et de sécurité impliqués dans la régulation longitudinale du véhicule, en situation nominale et en situation d'urgence. Des essais ont été menés sur route, piste et simulateur de conduite.

L'originalité de l'étude a porté sur la mesure du comportement du conducteur et de ses performances, pour approcher au mieux leur état fonctionnel (éveil physiologique, attention) induit par la charge mentale lorsqu'ils étaient confrontés à ces situations. On a privilégié l'utilisation de mesures physiologiques en continu et, en particulier, celles de l'activité électrodermale.

Les résultats obtenus ont permis de conclure que les conducteurs -soumis à une situation critique, et en conséquence à une charge mentale élevée - utilisaient ces systèmes d'aide de manière inappropriée. Découlent de ces conclusions, deux offres de formations pour pallier la méconnaissance et la mauvaise utilisation des systèmes d'aide et de sécurité.

The contribution of driving experimentation to the development of a training programme for advanced driver assistance systems.

Driving is one of the few activities which require both training and initial examination, but for which there are neither critical situation testing nor regular refresher courses. This creates two key problems: Through a lack of knowledge of the driving aids and safety systems offered by car manufacturers, drivers may fail to use or may misuse them in normal driving situations; secondly, an emergency situation may become critical if the driver has not previously experienced it in controlled conditions.

The aim of this study was to check whether novice and experienced drivers used the driving aids and safety systems proposed for vehicle longitudinal control in both nominal and critical situations. The experiments were carried out in the field, on safety tracks and on driving simulators. The uniqueness of the study comes from combining driver behaviour and performance measurements for better assessment of drivers' functional state (attention and workload) when they were confronted to these situations. We therefore favoured the use of continuous physiological measurements, and we specifically focused on electrodermal activity. The results enabled to conclude that using these systems during critical situations elicited high workload thus leading to inappropriate use.

These conclusions led to the development and deployment of two training programmes to compensate for the lack of knowledge and misuse of the driving aids and safety systems.

MOTS-CLÉS : Sécurité routière, Comportement du conducteur, Utilisation des systèmes d'aides à la conduite, Activité électrodermale.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à Pierre Denise et Jean Yves Le Coz qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Pierre, nous nous sommes connus au CNRS alors que j'étais étudiante en DEA, et 25 ans plus tard, tu évalues mon travail de thèse. C'est un réel plaisir pour moi.

Jean Yves, nous nous connaissons aussi depuis plus de vingt ans depuis que tu as rejoint le Département de Biomécanique et d'Accidentologie ; tu as toujours soutenu les études du comportement du conducteur chez Renault, en particulier via des mesures physiologiques. Maintenant tu es l'Expert Leader de l'entreprise en Sécurité Routière : qui d'autre que toi pouvait évaluer ce travail ?

Je remercie également Norbert Noury et Gérard Acourt, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Gérard, ton expérience sur tout ce qui touche à la formation des conducteurs à la conduite sûre et responsable, ainsi que nos actions communes depuis deux ans, font de toi une personne toute désignée pour évaluer cette étude.

J'aimerais remercier chaleureusement mon directeur de thèse et ami, Christian Collet. Malgré la distance qui sépare Lyon et Oyonnax de Guyancourt, tu as toujours été à l'écoute et d'excellents conseils. Cela a été un réel plaisir de travailler avec toi et de construire nos différentes expérimentations pendant toutes ces années. Je souhaite réellement que nos travaux communs puissent continuer au delà de cette thèse.

Merci aussi à Alain Muzet pour les nombreuses années de travail en commun sur ce thème de l'activité électrodermale, ainsi qu'à Thierry Bellet, spécialiste du comportement du conducteur, de s'intéresser à mes travaux.

Je remercie bien sûr Claude Tarrière, à l'initiative chez le constructeur automobile Renault de l'étude du comportement du conducteur par son activité physiologique. Sans lui, tous ces travaux n'auraient pu avoir lieu.

Un grand merci aux collègues de Renault - Alain, Philippe, Christophe, Lionel, Bruno, Jacques, Chloé, Félicia, Antoine, Carolina - qui ont participé aux expérimentations décrites dans ce travail. et contribué à améliorer le travail d'analyse et de dépouillement des données physiologiques, mécaniques et comportementales.

Merci aux membres de la grande famille ECF- Frédéric, René, Bruno et Pierre René, toujours prêts à se lancer dans de nouvelles aventures pour améliorer la sécurité routière.

À un niveau plus personnel, je remercie ma famille- Olivier, Marine et Guillaume- d'avoir supporté ma disponibilité limitée ces derniers mois, due à l'ajout de la finalisation de ce travail à mes activités professionnelles. 2011 aura été une année faste chez les Boulanger : 2 baccalauréats et une thèse.

Enfin, je dédie cette thèse à mon père qui m'a donné l'exemple en obtenant ce même diplôme en suivant une voie non conventionnelle, et qui a certainement contribué à me donner l'envie de faire de même.

Apport des études expérimentales en conduite automobile
dans la mise en place d'une formation à la sécurité routière.

I Introduction	p8
I- 1 - Les enjeux de la sécurité routière	p9
I-2- Les actions de Renault en faveur de la sécurité	p10
I-3- Le rôle du facteur humain dans la sécurité routière	p13
II L'interaction Homme-Machine :	
les risques liés à l'utilisation d'un système	p14
II-1-Le concept de charge mentale	p14
II-1-A- Tentative de définition	p14
II-1-B- Quelques propositions de modèles de la charge de travail	p15
II-1-C- Charge de travail en conduite automobile	p17
II-1-D-Moyens traditionnels pour mesurer la charge de travail d'un conducteur	p18
II-2 Nécessité de comprendre le fonctionnement d'un système d'assistance	p21
II-3 Défauts d'interactions possibles avec le système d'assistance	p25
II-4- Effet de l'activation sur l'utilisation d'un système	p26
II-5- Types d'études à réaliser selon le type de systèmes	p27
II-5-A Type de systèmes embarqués	p28
II-5-B Types d'études menées pour tester un nouveau système	p24
III- Choix des signaux physiologiques pour nos études	p29
III-1- Quels signaux pour quels besoins ?	p30
III-2- Support neuro-anatomique des manifestations périphériques de l'activité du Système Nerveux Autonome	p31
III-2-A- Inter-relations entre le SNC et le SNA	p32
III-2-A-a- Distinctions structurelles	p32
III-2-A-b- Double rôle du SNA	p33
III-3-Bref panorama des mesures physiologiques habituellement utilisées.	P38
III-4-De la recherche à l'industrie automobile : études menées par les constructeurs s'appuyant sur les mesures physiologiques	p40
III-5- Choix d'enregistrer l'activité électrodermale (AED)	p46
III-5-A Capteurs et équipements de mesure et d'enregistrement	p46
III-5-A-a- Electrodes	p46
III-5-A-b- Gel électrolytique	p48
III-5-A-c- Enregistrements	p48
III-5-B Analyse du signal électrodermal	p50
III-6- Quelques exemples d'utilisation d'indicateurs électrodermaux lors de conduite avec interface	p51

IV Utilisation de systèmes de régulation longitudinale : intérêt de la mise en situation	p53
IV -1 - Exemple du régulateur de vitesse	p53
IV-1-A- Utilisation en conduite nominale	p53
IV-1- A-a- Objectif	p53
IV-1- A-b- Le système d'aide	p54
IV-1- A-c- Apport de la démarche proposée	p56
IV-1- A-d- Protocoles expérimentaux	p56
IV-1- A-e- Première campagne d'essais	p57
IV-1- A-f- Deuxième campagne d'essais	p58
IV-1-B - Utilisation d'une nouvelle interface liée au régulateur en phase de Découverte	p65
IV-1- B-a- Proposition d'une IHM innovante	p65
IV-1- B-b- Apport de la démarche	p67
IV-1- B-c- Protocole expérimental	p67
IV-1- B-d- Résultats	p68
IV-1- B-e- Conclusion	p73
IV-1-C - Utilisation en situation critique de conduite	p74
IV-1- C-a- Contexte et objectifs	p74
IV-1- C-b- Apport de la démarche proposée	p74
IV-1- C-c- Protocole expérimental	p75
IV-1- C-d- Résultats	p78
IV-1- C-e- Discussion	p83
IV-1- C-f- Conclusion	p85
IV -2- Exemple du système de freinage	p 86
IV-2-A - Utilisation en conduite nominale	p86
IV-2- A-a- Contexte et objectif de l'étude	p86
IV-2- A-b- Protocole expérimental	p87
IV-2- A-c- Résultats	p90
IV-2- A-d- Conclusion	p93
IV-2-B - Utilisation en situation critique de conduite	p94
IV-2- B-a- Rappel du contexte	p94
IV-2- B-b- Le système d'aide utilisé	p94
IV-2- B-c- Apport de la démarche	p95
IV-2- B-d- Première expérimentation	p96
IV-2- B-e- Deuxième expérimentation	p102
V Mise en place d'une formation basée sur la mise en situation et sur l'utilisation pertinente des systèmes d'aide.	P109
V-1 rappel du contexte réel	p109
V-2 description de la formation	p 112

VI- Description de la Création d'un Service dédié conducteurs seniors, pour leur permettre une mobilité durable et responsable	p116
VI-1 Préambule : une question d'utilité et de santé publique grandissante	p116
VI-1-A- S'adapter à une infrastructure, un trafic et des véhicules en perpétuelle évolution	p117
VI-1-B- Continuer à conduire pour préserver sa place à part entière dans la société.	P118
VI-1-C - Reconnaître et gérer les dégradations de ses fonctions sensori-motrices et cognitives.	P118
VI-2- Objectif du projet	p119
VI-3- Descriptif du produit final	p119
VI-4- Déroulement de l'étude préalable	p120
VI-4 -A- Construction de la journée de découverte et sensibilisation initiale	p120
VI-4- B- Elaboration d'un système de veille active pour le maintien des acquis	p122
VII Conclusion	p123
VIII Annexes : présentations en congrès d'études basées sur la même double approche du comportement du conducteur	p127
VIII-1 Evaluation of a Time Warning Assistance system in the field through electrodermal response	p127
VIII-2- Driver electrodermal responses on a dynamic driving simulator	p131
VIII-3- Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving	p135
VIII-4- An integrate device to evaluate a driver's functional state	p141
VIII-5 Assessing workload through physiological measurements in bus drivers using an automated system during docking	p148
VIII-6 Stroop color- word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation	p158
IX Bibliographie	p167

I - Introduction

I-1 - Les enjeux de la sécurité routière

La sécurité routière est un véritable enjeu de santé publique au niveau mondial. Tous les continents sont concernés. Selon l'OMS, on déplore chaque année 1,2 million de tués sur les routes et environ 50 millions de blessés. Si les tendances actuelles se confirment, le nombre annuel des décès et des incapacités dus aux accidents de la route pourrait augmenter d'ici 2020 de plus de 60 %, ce qui les placerait alors en 3^e position dans la liste OMS des dix principales causes de mortalité et de traumatismes dans le monde. Ils n'occupaient que la 9^e position en 1990 (Figures 1 et 2).



Figures 1 et 2 : insécurité routière dans le monde : une réalité toujours présente. Source : World Health Organization 2002

Les pays sont très inégaux devant ce fléau. La plupart de ces accidents surviennent et surviendront dans les pays en développement où de plus en plus de personnes utilisent des transports motorisés, et où la législation en termes de sécurité routière est parfois réduite, voire inexistante. Par exemple, l'Inde et la Russie, qui sont sous représentées par le nombre de conducteurs, sont pourtant

sur représentées quant il s'agit de mortalité routière ; à l'inverse de l'Amérique du nord et de l'Europe.

En revanche, dans de nombreux pays d'Europe et en France, les tendances sont encourageantes et le nombre de tués et blessés évolue à la baisse (Figure 3). Mais, avoir à déplorer autour de 4000 morts chaque année sur nos routes nous incite à penser que les recherches pour améliorer la sécurité routière restent une priorité de santé publique. Le bilan est très contrasté : dans les pays émergents, la situation s'aggrave. Dans les pays industrialisés, la situation s'améliore du fait- entre autres- du renouvellement du parc automobile, qui introduit de nouvelles aides à la conduite. Celles ci ne doivent pas troubler le conducteur, et avoir un effet inverse à celui pour lequel elles ont été conçues.

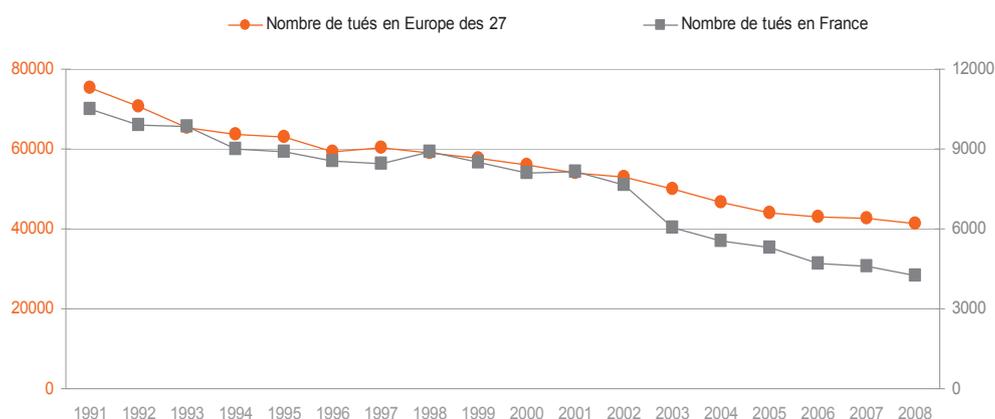


Figure 3 : Évolution 1991-2008 des tués en Europe et en France
Source : statistiques sanitaires mondiales

I-2- Les actions de Renault en faveur de la sécurité

Depuis de nombreuses décennies Renault s'est imposé comme acteur fort de la sécurité routière. D'abord en matière de sécurité passive pour protéger les occupants en situation d'accident, ensuite en sécurité active en développant des systèmes d'aide pour éviter l'accident ou limiter ses conséquences.

Cinq verbes d'actions résument les procédures mises en place au fil des ans :

Prévenir : c'est développer une gamme d'équipements pour alerter le conducteur ou lui faciliter la conduite.

Corriger : c'est proposer des aides à la conduite intervenant dans des conditions difficiles ou d'urgence sans se substituer complètement au conducteur.

Protéger : c'est assurer une protection optimisée pour les occupants de toutes les places et de tous les âges.

Secourir : c'est contribuer à l'efficacité de l'intervention des Services de Secours auprès des blessés.

Sensibiliser : c'est faire comprendre à chacun son rôle dans la prévention du risque routier.

Quatre de ces cinq verbes et les systèmes et actions associés, interviennent chacun à un moment précis de la conduite, entre la phase nominale et la phase post accident (figure n° 4). Le verbe '*sensibiliser*' se concrétise par des actions d'information et de formation auprès de tous les utilisateurs de la route.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons exclusivement à la déclinaison des verbes Prévenir et Corriger en étudiant des situations qui concernent le conducteur en situation de conduite nominale ou critique, en interaction avec certains systèmes d'aides mis à sa disposition.

Le monde automobile a bénéficié, ces dernières décennies, d'importantes transformations liées aux évolutions technologiques et à l'électronique

embarquée. Il voit l'émergence de systèmes d'aide à la conduite de plus en plus sophistiqués. Ces dispositifs se définissent comme « assist[ant] le conducteur dans la réalisation d'une tâche de conduite en prenant en charge certains aspects ou en doublant certaines fonctions. Une aide contribue à mieux atteindre le résultat souhaité, dans de meilleures conditions ou de manière plus fiable » (Malaterre & Saad, 1986).

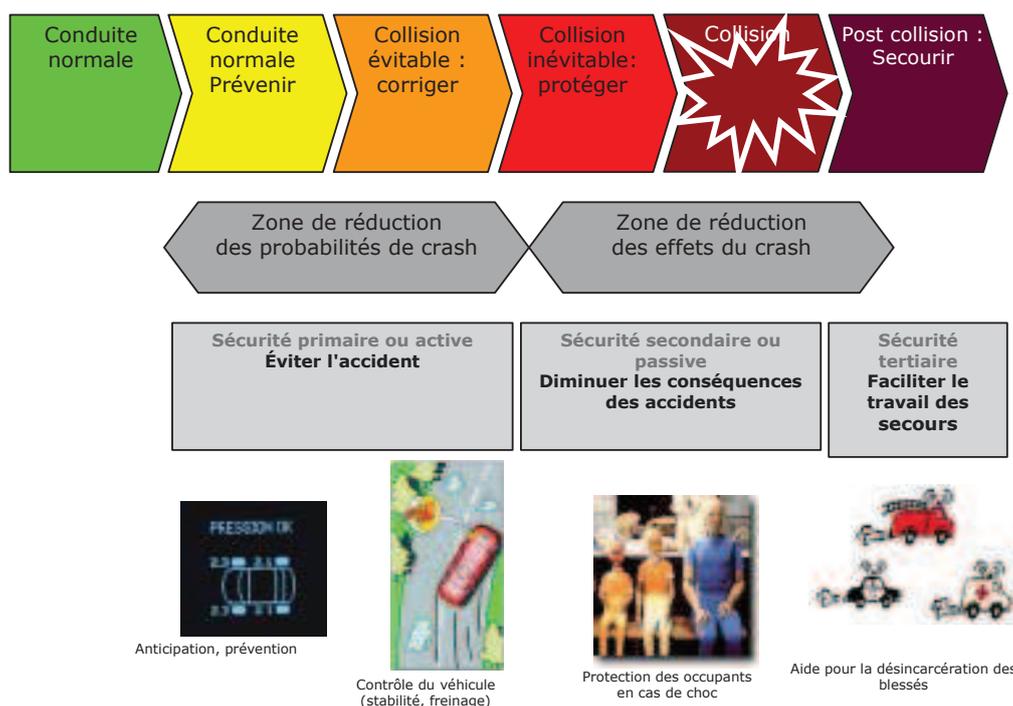


Figure 4 : chronologie d'un accident et actions associées pour l'éviter ou le minimiser.

Les verbes Prévenir et Corriger résument bien ce qui peut être mis en place pour aider le conducteur dans sa tâche de conduite..

Prévenir le conducteur, c'est l'aider à anticiper les risques et lui faciliter la conduite. Une partie de la solution consiste à le responsabiliser. Il doit mieux connaître les limites à partir desquelles il sera dans l'incapacité de maîtriser son véhicule et les situations dans lesquelles il se met en danger. Les constructeurs automobiles mettent ainsi à leur disposition des équipements leur permettant de s'auto-responsabiliser : le régulateur-limiteur de vitesse apporte un surcroît de

confort et de sécurité en permettant au conducteur de ne pas dépasser la vitesse qu'il s'est fixée. L'alarme visuelle et sonore de non-port de ceinture est un équipement incitatif essentiel, car 20 % de vies pourraient être sauvées chaque année en Europe, si tout le monde portait sa ceinture. La prévention repose aussi sur des informations utiles, comme le système de surveillance de la pression des pneumatiques, par exemple. En effet, 6 % des accidents mortels sur autoroute sont liés à un éclatement de pneumatique. La prévention dépend également d'une meilleure appréhension de l'environnement : c'est le cas avec les phares au xénon qui procurent une lumière proche de celle du jour, et permettent au conducteur de mieux anticiper une situation à risque en allongeant la distance de visibilité pour la porter à plus de cent mètres. Anticiper les risques, c'est enfin permettre au conducteur de se concentrer sur sa tâche principale en l'assistant dans l'accomplissement de tâches annexes. L'allumage automatique des feux et essuie-glaces concourt à cette assistance.

Corriger, c'est développer des aides à la conduite assistant le conducteur dans des conditions difficiles ou d'urgence sans se substituer complètement à lui.

La qualité du comportement routier et celle du freinage sont les fondamentaux dynamiques du véhicule. Ils constituent la base de l'évitement de l'accident. Il existe des situations où l'apport de la technologie est nécessaire pour compenser les erreurs de pilotage, dans la mesure du possible. C'est l'objectif des aides à la conduite. Elles interviennent dans des conditions difficiles ou d'urgence, mais sans se substituer complètement au conducteur.

L'ABS¹ est un système qui évite le blocage des roues lors d'un freinage d'urgence et permet de conserver la maniabilité du véhicule. L'assistance au freinage d'urgence (AFU) permet au conducteur d'exploiter toute la puissance du système de freinage en déclenchant un freinage maximal plus tôt et en le maintenant jusqu'à l'arrêt du véhicule. Enfin, le contrôle dynamique de conduite ESC² aide le

¹ Anti-blocking system

² Electronic Stability Control ou ESP (Electronic Stability Program - marque de Bosch)

conducteur à conserver la maîtrise de sa trajectoire en cas de dérive du véhicule lors d'une manœuvre urgente.

I-3- Le rôle du facteur humain dans la sécurité routière

Les éléments explicatifs de la situation d'accident sont endogènes (état du conducteur, expérience, capacité à maîtriser le véhicule) ou exogènes (infrastructure routière, conditions de circulation et climatiques, état du véhicule).

On observe, dans la grande majorité des accidents corporels, qu'un élément endogène y a contribué et que, dans près des deux tiers des cas, un élément externe y a participé.

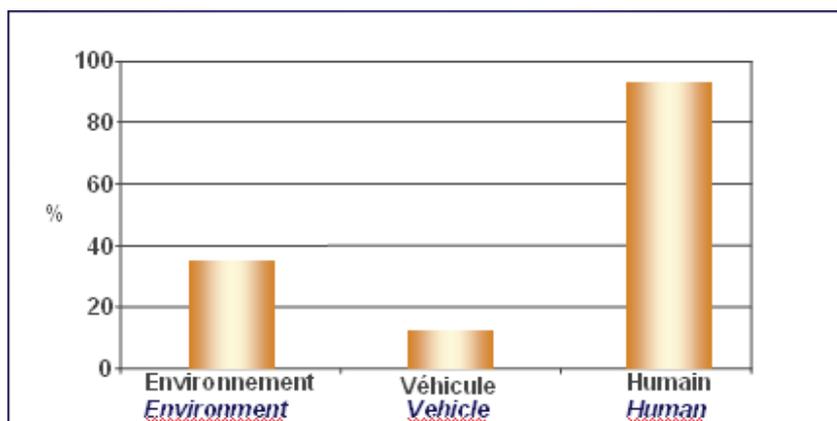


Figure 5 : Distribution des accidents corporels avec au moins un élément explicatif selon leur caractère endogène ou exogène. Source : LAB (Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique commun aux deux constructeurs français : Renault et PSA)

Le facteur humain est donc souvent mis en cause : dans un cas sur deux, un problème de perception du conducteur est mis en évidence. Perception, compréhension et interprétation de la situation routière sont impliquées dans 85% des accidents étudiés. Ces défauts pourraient et devraient être palliés, en partie, par l'intégration des systèmes techniques permettant d'assister le conducteur dans sa tâche de conduite (Page, 2000 ; Page et Hermitte, 2010).

L'introduction de ces nouvelles technologies dans les automobiles, mais aussi dans les infrastructures (panneaux indicatifs de bouchons ou d'accident sur les autoroutes), a pour rôle d'aider le conducteur, aussi bien en mode de conduite nominale pour le décharger des tâches annexes interférant avec la conduite, qu'en situations inattendues, monotones ou dangereuses pouvant conduire à un accident. Elles contribuent ainsi à améliorer sa sécurité.

Dans ce contexte de sécurité réelle, l'objectif de cette thèse est de vérifier si les conducteurs savent effectivement utiliser judicieusement les aides à la conduite et les dispositifs de sécurité mis à leur disposition dans leur véhicule ; puis d'utiliser les données acquises pour proposer des contre mesures aux conducteurs.

II L'interaction Homme-Machine : les risques liés à l'utilisation d'un système

II-1- Le concept de charge de travail

II-1-A-Tentative de définition

Malgré son omniprésence, la charge de travail est difficile à définir exactement. Trois dimensions sont sensées avoir une influence forte sur ses fluctuations : la contrainte temporelle, l'intensité/complexité de la tâche à réaliser, l'état psycho physiologique de l'opérateur. Plus simplement, la charge de travail peut être définie comme les ressources ou les capacités dont un opérateur a besoin pour réaliser une tâche.

Parce que la charge de travail est liée au processus cognitif nécessaire à traiter des informations, une tâche automatisée exige peu de ressources mentales alors que la charge de travail reflète une demande effective de ressources à l'opérateur. À l'inverse de la tâche automatisée, la surcharge peut être définie comme une demande excessive des ressources perceptrices et cognitives (la

perception visuelle et auditive, la mémoire, l'attention ...) pour traiter des informations.

La charge de travail est induite par l'interaction entre l'opérateur et les exigences de la tâche : elle dépend donc des spécificités de cette dernière et des caractéristiques de l'opérateur telles que son expérience et ses capacités. En conséquence, c'est une mesure qui peut varier selon les opérateurs : pour un même niveau de performance atteint, elle pourra demander davantage d'effort à l'un qu'à l'autre. Quand la demande imposée par une tâche augmente, l'opérateur doit puiser dans ses ressources internes, de manière à maintenir un même niveau de performance : dans ce cas, sa charge de travail augmente, mais le niveau de performance peut être maintenu. Quand la demande imposée par la tâche devient trop élevée, les ressources internes ne sont plus suffisantes et la performance est dégradée.

Il faut également envisager le cas où les ressources du sujet sont suffisantes mais où c'est la perception qu'il se fait de la difficulté de la tâche qui l'empêche de la réaliser correctement. À côté de la dimension objective de la charge, il y a son aspect subjectif que Gaillard (1993) a bien résumé par les concepts de stress et strain ; en français, contrainte et astreinte.

II-1-B-Quelques propositions de modèles de la charge de travail

Les modèles décrits ci après aident à mieux comprendre l'aspect multidimensionnel de la charge mentale et à interpréter les variations des indicateurs psychologiques et physiologiques mesurés.

Le modèle de Wickens (1984) propose que la charge mentale soit divisée en différentes catégories telles que charge visuelle, motrice et affective :

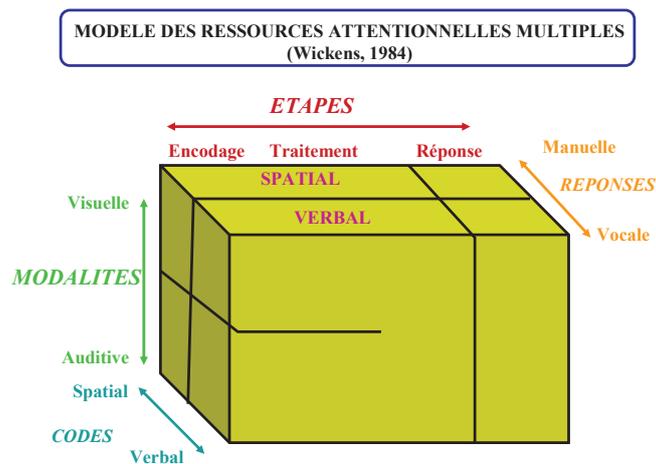


Figure 6 : Modèle des ressources attentionnelles, d'après Wickens (1984).

Dans ce modèle, cet aspect multidimensionnel est décrit selon l'hypothèse suivante : une tâche spécifique implique plusieurs ressources ou canaux nerveux (auditifs, visuels...). Comme la principale source d'information en conduite automobile est visuelle, de nombreuses études traitent essentiellement de la charge visuelle.

Le modèle de Miller et Hart (1984) préconise d'étudier 9 dimensions en détail : la contrainte temporelle, la performance, l'effort mental, l'effort physique, la frustration, le stress, la fatigue et le type d'activité. Chacune de ces dimensions affecte la capacité de traiter l'information par l'opérateur. Cette première contribution a débouché sur la publication de Hart et Staveland en 1988, avec la proposition de test de la charge, le NASA-TLX. La NASA-TLX (Task Load index) est l'une des méthodes d'évaluation subjective de la charge mentale les plus employées en ergonomie. Initialement développée pour l'aéronautique, elle est aujourd'hui utilisée dans de nombreux secteurs d'activité. Cette échelle multicritères soulève toutefois des interrogations méthodologiques quant à son exploitation. La pondération des notes obtenues pour chacun de ses six critères d'astreinte (activité mentale, activité physique, contrainte temporelle, performance, frustration et effort) se réalise par des jugements comparatifs

entre paires de critères. Cette comparaison demandée à l'opérateur n'est pas toujours facile à réaliser, compte tenu du caractère abstrait qu'elle peut revêtir (ex : frustration versus activité physique...).

En 1988, Spérandio propose de diviser la charge de travail en 4 niveaux (bas, moyen, haut et excessif), chacun correspondant à un état opérationnel (mode opérationnel stable, variations dans le mode opérationnel, changements dans le mode opérationnel, et arrêt de la tâche).

Boucsein, d'abord en 1993 puis en 2011, compléta le modèle similaire de Pribam et McGuinness (1975). Ce modèle se base sur trois niveaux d'activation (activation perceptive, activation affective et activation préparatoire à l'action), chacun étant corrélé à des variations spécifiques d'indicateurs physiologiques centraux ou périphériques.

II-1-C- Charge de travail en conduite automobile

La charge de travail du conducteur est définie comme une quantité de ressources ou de capacités engagées- en termes d'effort et d'attention - nécessaires à la conduite, tâche qui consiste à contrôler continuellement le véhicule, de façon sûre, dans un environnement dynamique. Pour une même tâche, la charge sera plus élevée chez le conducteur novice ou fatigué que chez le conducteur expérimenté ou alerte.

Il est primordial de savoir évaluer quantitativement les modifications de la charge de travail des conducteurs, au cours de la conduite, en particulier lorsqu'ils sont amenés à interagir avec les systèmes d'aide embarqués. Pour cela, il est indispensable d'étendre le champ d'application des facteurs humains traditionnels, qui consistent classiquement à décrypter le comportement du conducteur en étudiant ses actions, ou en lui demandant de les formaliser par la parole. De même, il existe un besoin de propositions de procédures

systematiques et de critères quantitatifs pour tester la sécurité des interactions homme-machine avant d'introduire de nouveaux systèmes sur le marché.

II-1-D- Moyens traditionnels pour mesurer la charge de travail d'un conducteur

Recueils de données subjectives

Les mesures subjectives de charge mentale sont très répandues ; elles consistent en des entretiens post essais d'auto évaluation, de remise en situation, des questionnaires ou des échelles à remplir. L'information permet de connaître les facteurs de charge à l'œuvre et d'estimer subjectivement la charge de travail (prise comme l'astreinte). Ces mesures sont naturellement dépendantes de la motivation du sujet à s'auto évaluer, de sa capacité à identifier les facteurs de charge, et à se souvenir des détails de la tâche réalisée, surtout si elle a été effectuée en situation critique. Ces mesures ont pour limite de n'être collectées que postérieurement aux essais, car recueillies en cours d'essai, elles contribueraient à dénaturer la charge étudiée en introduisant une charge supplémentaire. De plus, dans ce contexte expérimental, il est demandé au sujet d'analyser à travers le langage (donc à partir de données mémorisées déclaratives) son comportement qui relève de données mémorisées procédurales. Elles sont directement accessibles mais elles nécessitent un traitement des données laborieux.

Mesures comportementales

Les mesures comportementales sont souvent des mesures de performance faites dans le contexte d'un protocole expérimental qui les rend possible. Les indicateurs de performance de conduite habituellement utilisés sont : la vitesse, la position latérale du véhicule sur la voie, les variations de mouvements du

volant, les délais d'appuis et les efforts sur les pédales, ainsi que le temps de parcours nécessaire au trajet demandé.

La baisse de la performance de conduite est habituellement interprétée comme une augmentation de la charge mentale du conducteur. Quand une surcharge de travail est choisie intentionnellement par le conducteur (conversation, écoute de la radio en plus de la conduite), ce dernier essaiera généralement de la maîtriser en rendant la conduite plus facile, par exemple en réduisant sa vitesse, comme mécanisme de compensation ou d'adaptation. On aborde ici la notion de quantité d'information, associée à la caractéristique du système nerveux humain d'avoir une capacité de traitement limitée. On comprend donc que lorsque la quantité d'information augmente, la seule solution est d'augmenter en parallèle la durée du traitement.

La tâche secondaire n'est pas directement reliée à la conduite (écoute de la radio, conversation, par exemple). La comparaison des variations de performance des tâches primaire et secondaire peut être un élément de mesure de la charge mentale. Par exemple, certaines études introduisent une tâche secondaire comme une détection de signal en périphérie de pare brise, et mesurent le temps de réaction et le taux d'omission, comme indicateurs de la charge mentale (Klingberg, 2000). Plus ces indicateurs s'élèvent, plus la charge s'accroît.

Mesures physiologiques

Les signaux physiologiques présentent l'avantage d'une meilleure objectivité tout en permettant une estimation continue. Mais sont aussi sujets à discussion. Au niveau central, les enregistrements électroencéphalographiques (EEG), électro-oculographiques (EOG) peuvent être utilisés en recherche appliquée aux facteurs humains tout comme l'électromyographie (EMG) comme indicateur périphérique comportemental. Dans cette perspective « neuroergonomique », la charge mentale pourrait être définie comme un ensemble d'états mentaux et cérébraux modulant la performance humaine à des tâches perceptives, cognitives ou motrices (Kramer et al., 2007). Au niveau végétatif, des

corrélations ont été trouvées entre des variations physiologiques et la charge mentale subjective, sans qu'aucun n'en soit reconnu seul, comme une mesure fiable et précise (Athènes et al., 2002). La notion « biologique » d'activation physiologique serait la plus proche de celle de charge mentale, plus « psychologique » (Collet et al., 2003). En effet, elle varie avec l'attention (dimension intensive) et la vigilance, qui ont en commun d'augmenter lorsque l'organisme mobilise des ressources pour s'adapter aux exigences changeantes de son milieu. Or, l'activation physiologique est une notion large, non spécifique : la charge mentale induit un coût pour l'individu, coût identifiable par la mesure de l'activation physiologique. Elle représente donc un indicateur fiable de la charge mentale, pour peu que l'environnement du sujet soit suffisamment bien connu pour pouvoir identifier les éventuelles autres sources d'activation physiologique. Les signaux du système végétatif les plus souvent utilisés sont d'origine cardiaque, respiratoire, thermique et électrodermale.

L'étude de la charge de travail en situation de conduite est importante pour la conception des futurs systèmes d'aide. Il est nécessaire de développer une connaissance plus approfondie du comportement de conduite pour justifier le développement et la mise au point de ces systèmes. Des méthodologies rigoureuses sont indispensables pour décrire, analyser et modéliser le comportement de conduite. L'harmonisation de ces méthodologies serait une aide importante pour le concepteur et ensuite pour l'homologation des nouveaux systèmes ou nouvelles interfaces. Or, beaucoup de recherches passées et en cours, utilisent des outils et des méthodologies très variées pour analyser le comportement de conduite. Parmi ce panel de mesures, lesquelles doit on privilégier ? En premier lieu, sélectionner les mesures de charge mentale les plus adaptées de manière à répondre à des questions spécifiques sur un système particulier, sous entend de bien connaître le système que l'on souhaite étudier, et surtout la tâche de conduite.

II - 2 Nécessité de comprendre le fonctionnement d'un système d'assistance

L'utilité des systèmes d'aide à la conduite est implicite mais leur efficacité réelle reste à démontrer car elle suppose que le conducteur ait appris à s'en servir. Ces systèmes pourraient, en effet, ne pas être utilisés ou, pire, être mal utilisés par les conducteurs. La majorité a acquis des automatismes de conduite de voitures d'ancienne génération, privées de ces aides, et dans un environnement routier beaucoup moins contraignant. Le risque de mauvais usage est donc réel. Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine de la défaillance d'interaction entre le conducteur et un système d'aide.

La connaissance du fonctionnement du système peut être insuffisante. Une mauvaise interaction avec lui peut résulter d'un défaut d'apprentissage ou d'un usage détourné, et entraîner des situations non prévues par le concepteur. Elle peut également être consécutive à un diagnostic inadapté à la situation ou à des erreurs opératoires, des manœuvres incorrectes, ou enfin à une fausse représentation mentale des fonctions du système. Il arrive également que le conducteur pense que le système peut réaliser une tâche qu'il n'est en fait pas censé effectuer. Il faut donc éviter les dissonances entre ce que peut faire le système en termes d'assistance et ce que le conducteur croit que le système peut faire. La figure 6 résume les interactions possibles conducteur - système, qu'elles soient positives ou négatives.

L'emploi d'un nouveau dispositif débute généralement - en tout cas idéalement - par une phase d'apprentissage de son fonctionnement. Pour les systèmes qui équipent nos véhicules, elle s'apparente plutôt à une présentation succincte des fonctions et des commandes du système lors de la mise en main par le vendeur. L'utilisateur découvre donc largement le fonctionnement d'un système, par l'expérience, dans des situations réelles d'usage et s'en construit une représentation mentale. Ce qu'il en perçoit et comprend détermine en grande partie ce qu'il en fera selon ses besoins réels.

Cette nécessité de phase d'apprentissage de l'utilisation d'un système d'aide en conduite a été montrée par Collet et al. (2003) lors d'expérimentations pour valider la prise en main d'un système d'aide à l'accostage par des conducteurs de bus. Quelques accostages successifs ont montré l'amélioration continue de la performance, et la baisse parallèle de la charge associée à chaque manœuvre.

Une telle appropriation, ou adaptation personnelle de l'usage, est fréquente pour la plupart des dispositifs qui nous entourent, mais peut présenter le risque que le modèle mental ne soit pas en accord avec son fonctionnement réel. On parle alors de dissonance, phénomène qui peut parfois entraîner des usages non prévus par le concepteur, avec les risques associés, comme indiqué sur la figure 7.

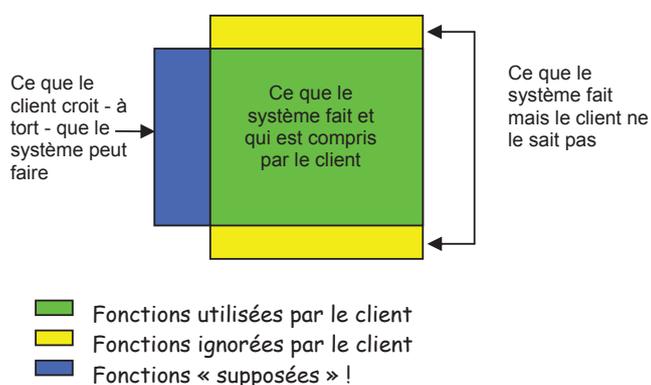


Figure 7 : Les champs de représentation d'un système par l'utilisateur

Une question importante en conception automobile d'Interfaces Homme Machine (IHM) est donc de s'assurer que les usagers peuvent s'approprier le système sans formation préalable, celles-ci étant jusqu'alors difficiles à mettre en œuvre. Une réponse possible s'appuie sur la notion d'affordance, capacité d'un objet à suggérer sa propre utilisation. C'est le psychologue James J. Gibson qui a proposé ce terme en 1977. Le terme a ensuite été utilisé dans différents champs, notamment la psychologie cognitive, la psychologie de la perception, le design, l'interaction homme-machine et l'intelligence artificielle. On doit à la psychologie la définition originale de l'affordance : elle désigne « toutes les possibilités d'actions sur un objet ». Cette définition s'est ensuite restreinte

aux seules possibilités dont l'acteur est conscient. Par la suite le terme a été utilisé en ergonomie de manière encore plus restreinte : pour se référer à la « capacité d'un objet à suggérer sa propre utilisation », par exemple, sans qu'il ne soit nécessaire de lire un mode d'emploi. Le terme d'affordance est emprunté à l'anglais et il est parfois improprement traduit par potentialité. Il dérive du verbe *to afford* qui a un double sens : « être en mesure de faire quelque chose » et « offrir ».

Une autre définition possible réside dans l'« intuitivité » du système, notion qui peut être illustrée par le principe connu, même s'il est un peu abrupt : « un bon produit n'a pas besoin de notice ». L'intuitivité a été décrite par Jordan (1998) comme l'efficacité, l'efficience et la satisfaction avec lesquelles des utilisateurs peuvent réaliser des tâches définies avec un dispositif particulier dès le premier usage. Une intuitivité réussie ne garantit certes pas un usage détourné mais elle en limite la probabilité d'occurrence aux actions volontaires (une frange d'utilisateurs « joueurs »...). Or, un système a davantage de chances d'être considéré comme intuitif si son usage fait appel à des principes d'interaction qui évoquent chez l'utilisateur des savoirs ou des savoir-faire existants, ayant fait l'objet d'apprentissages antérieurs. Cela est possible, par exemple, en utilisant des sémantiques connues, des stéréotypes d'actionnement des commandes, des codes, des standards reconnus et compris (par exemple : rouge signifie danger....dans les cultures occidentales !). Les deux pictogrammes ci-dessous sont de bons exemples visuels d'un code d'utilisation acquis.



Une commande rotative est comprise comme incrémentant la fonction en sens horaire. La « case à cocher » devient un standard reconnu.

Plus précisément, on cherchera à respecter les couplages perception-action profondément ancrés dans nos acquis (Ex. : j'appuie fort sur la pédale de frein pour arrêter mon véhicule en urgence). Ils renvoient à des liaisons sensori-

motrices' largement automatisées, qui ont donc été construites par l'expérience et qui sont devenues difficiles à expliquer et à verbaliser par le sujet car elles sont conservées par la mémoire procédurale. Mais alors, quid de l'innovation ? Evidemment ceci ne veut pas dire que toute innovation en matière d'interaction utilisateur/système serait interdite. Mais il s'agit de veiller à ce que le nouveau mode d'actionnement, ou le nouvel instrument n'entrent pas en conflit avec les couplages sensori-moteurs déjà construits et profondément ancrés. S'il y a un conflit, une phase d'apprentissage sera nécessaire, même si l'innovation apporte un progrès dans l'usage : le concepteur devra garder en mémoire que ce qui ne peut être expérimenté spontanément doit être expliqué. Un exemple de couplage sensori-moteur préexistant en conduite automobile est celui de l'utilisation du système de freinage ABS (anti-blocking system) qu'en font les conducteurs sur route mouillée. Beaucoup d'entre eux, même avertis de son fonctionnement, ont une réticence à freiner au maximum en situation d'urgence, alors que cela améliorerait son efficacité : l'idée selon laquelle un freinage intense sur route mouillée entraîne la perte de contrôle du véhicule qui se met à déraper est fortement ancrée. Cette représentation était plausible sur les véhicules d'ancienne génération dépourvus d'ABS, véhicules sur lesquels bon nombre de conducteurs actuels ont appris à conduire.

Ceci a été mis en évidence lors d'essais de freinages d'urgence réalisés sur piste et que nous détaillerons plus loin (Priez et al. 1999). Une des conclusions de l'étude a aussi été de tenir compte des comportements réels de freinage des conducteurs lambda dans la spécification du mode de fonctionnement des systèmes d'aide au freinage d'urgence (AFU) : on a préconisé, par exemple, de privilégier celui qui permettait le maintien de l'appui sur la pédale de frein pendant toute la durée du freinage, action peu réalisée par la plupart des conducteurs, alors qu'elle permet de réduire la distance de freinage.

II-3 Défauts d'interactions possibles avec le système d'assistance

Un apprentissage insuffisant, ou trop difficile, n'est pas la seule cause d'une « mauvaise » interaction avec un système.

Le conducteur peut également faire une erreur d'opération liée à un excès de confiance dans le système. Il lui délègue une fonction qu'il exerce normalement. Il en résulte une diminution de la charge mentale générale puisque le système n'est surveillé que par une attention diffuse, faiblement coûteuse en ressources mentales. Cette perte d'attention ou baisse de vigilance peut être la conséquence directe d'une délégation sans contrôle. Le danger peut aussi venir du passage de la délégation à la complaisance. Ce phénomène consiste à interagir le moins possible avec le système, à se contenter d'une situation, pour limiter les changements d'états ou le nombre d'actions. Par exemple, un conducteur pourra accepter de rester à vitesse régulée, même en trafic dense, pour éviter de devoir désactiver puis réactiver le système.

Une « mauvaise » interaction avec un système peut aussi résulter d'un usage détourné (parce que le besoin réel de l'utilisateur a été mal cerné : exemple des commandes +/- du RV utilisés comme accélérateur et décélérateur à main) et entraîner des situations non prévues par le concepteur.

Elle peut encore être consécutive à un diagnostic erroné de la situation ou à des erreurs opératoires, des fausses manœuvres ou, plus fondamentalement, être liée à une représentation mentale erronée des fonctions du système par son utilisateur, comme mentionné ci-dessus.

II-4- Effet de l'activation sur l'utilisation d'un système

Comme précisé antérieurement, la charge de travail comprend une dimension quantitative, attestée par le niveau d'activation, et une dimension qualitative, représentée par les opérations de traitement de l'information (Näätänen, 1973).

Le comportement de conduite peut ainsi être modifié suivant le niveau d'activation du conducteur. L'activation est l'ensemble des mécanismes qui sont sous-tendus par le système activateur ascendant (tronc, mésencéphale, diencéphale et cortex) et qui constituent la base de l'efficacité mentale et de l'efficacité maximale du comportement, en permettant la discrimination et la précision de toute activité perceptuelle, cognitive, émotionnelle et motrice.

Un niveau d'activation faible ou élevé est synonyme de mauvaises performances, comme l'indique la figure 8 ci-dessous.

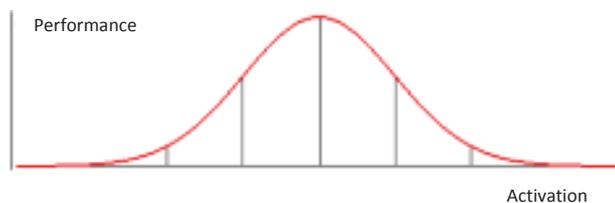


Figure 8 : Forme de la relation supposée entre activation et performance, d'après Yerkes et Dodson, 1908.

Une activation excessive entraîne toute une chaîne de dysfonctionnements du comportement : une difficulté d'analyse de la situation, un retard de décision (sidération, paralysie), des difficultés d'accès en mémoire lors des fonctions de rappel et de reconnaissance, ainsi qu'une focalisation sur le présent faisant oublier tous les acquis, une perte de contrôle pouvant aller jusqu'à la panique. Une forte sur activation peut également induire une grande difficulté à se remémorer le déroulement des événements a posteriori ; ce qui explique la discordance entre le discours et la réalité quand on relate un incident. L'ensemble de ces altérations correspondent à un bruitage interne des opérations de traitement de l'information.

Si une situation critique survient, le temps d'analyse s'allonge avec comme conséquence une augmentation du temps de réaction (classiquement, le temps de réaction varie en fonction des opérations de traitement central : perception, décision, programmation). La nécessité de la reprise en main peut entraîner l'apparition d'incidents si la maîtrise du système est imparfaite. Dans le cas particulier du régulateur de vitesse, une reprise en main est nécessaire en cas de situation inhabituelle. Elle peut amener un retour à la conduite nominale, mais en cas de sur activation induite par la situation, peut mener le conducteur à une action inappropriée sur le système ou le véhicule, voire à un incident de conduite ou à un accident. La figure 9 illustre la chronologie possible des apparitions de situations accidentogènes liées au mauvais usage d'un système d'aide peu intuitif.

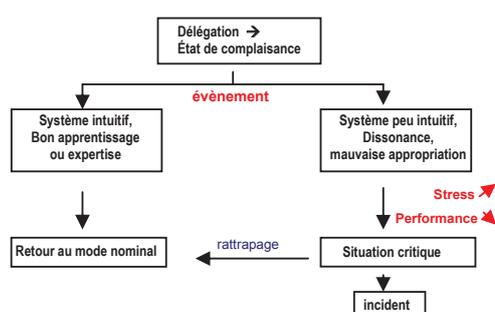


Figure 9 : chronologies des possibles apparitions de situations accidentogènes liées au mauvais usage d'un système d'aide.

II-5- Types d'études à réaliser selon le type de systèmes d'aides testés

On a vu qu'il était important de tester les interactions homme-machine potentielles lors de l'introduction de nouveaux systèmes dans les véhicules. Selon le type d'interactions que les systèmes d'aide vont générer auprès du conducteur, il faut catégoriser les systèmes ainsi que les situations de conduite

II-5-A- Types de systèmes embarqués

- Systèmes aidant le conducteur et qu'il n'active pas volontairement, ou tout au moins indirectement (ex : l'ABS en freinant). Ils ne sont pas supposés avoir un impact sur la charge mentale.
- Systèmes apportant une information au conducteur, mais sans l'aider dans sa tâche de conduite. Ils ont un effet sur la charge mentale et impliquent une régulation de la part du conducteur (ex : la radio).
- Systèmes ayant un impact direct sur la tâche de conduite, et impliquant une interaction avec le conducteur quand ils sont activés (ex. : le régulateur de vitesse). Ces systèmes ont également un effet sur la charge mentale.

II-5-B- Types d'études menées pour tester un nouveau système

- Utilisation du système en situation nominale pour vérifier si :
 - son usage est facile et non générateur de stress ou d'erreurs
 - sa prise en main est rapide et aisée.
- Utilisation du système dans des situations spécifiques (situation d'urgence).
- Comparaison de conditions avec et sans système, de manière à tester son impact sur la conduite. Les éléments comparés sont généralement la charge, l'attention, la fatigue, la somnolence...

III- Choix des signaux physiologiques pour nos études

On a privilégié l'enregistrement d'indicateurs physiologiques du conducteur car cette approche permet de s'affranchir de l'aspect subjectif de la plupart des autres méthodes basées sur le recueil des verbatim et ressentis. Quelle que soit la bonne foi des personnes interrogées, elles peuvent ne pas se souvenir exactement de leur comportement, et vont donc avoir du mal à l'explicitier, surtout si elles ont été soumises à une situation critique.

En comparaison, les méthodes d'ergonomie sont basées sur le recueil de données verbalisées. Or, nous travaillons sur le comportement et, si les savoir-faire de la conduite sont mémorisés, ils relèvent de la mémoire procédurale, qui est difficilement accessible par le langage (le langage n'est pas le code symbolique du savoir-faire, c'est le comportement). Cette démarche suppose aussi que le conducteur ait un niveau d'analyse suffisant pour pouvoir retranscrire ce qu'il a vécu et ressenti. Les capacités cognitives et mnésiques de chaque sujet doivent influencer la quantité et la qualité du matériel rappelé.

L'autre intérêt des enregistrements physiologiques est qu'ils retracent en continu toutes les variations internes du conducteur pendant la situation de conduite et peuvent être associés à tout moment à une situation ou une action que l'on souhaite particulièrement étudier et comprendre.

Les indicateurs physiologiques ont néanmoins des limites : leur caractère invasif et peu ambulatoire. Pour ce qui est du végétatif, il ne représente qu'une inférence du fonctionnement du système nerveux central. Les opérations cognitives qui sont étudiées, ne le sont qu'indirectement, au niveau de certains effecteurs périphériques.

Ces méthodes (ergonomiques et physiologiques) sont complémentaires, et les comportements complexes doivent faire l'objet d'études à partir de méthodes

différentes, complémentaires et même parfois redondantes. La redondance améliore la fiabilité des données.

La Direction de la Recherche chez Renault s'est impliquée dans l'investigation physiologique du conducteur depuis les années 1960, et s'est spécialisée dans le recueil et l'analyse des paramètres du Système Nerveux Autonome (SNA) depuis les années 1990 en collaboration avec le Laboratoire P3M (Performance Motrice, Mentale et du Matériel) de l'Université Lyon 1, et le laboratoire micro-capteurs et microsystèmes biomédicaux de l'INSA de Lyon.

III-1 - Quels signaux pour quels besoins ?

Les paramètres physiologiques utilisés dans les études qui seront présentées dans ce mémoire ont été sélectionnés à l'issue de nombreuses expérimentations en conduite réelle. Ils permettent, via un enregistrement périphérique et non invasif (électrodes fixées sur la peau), d'avoir accès au fonctionnement cognitif interne du conducteur.

Le signal dont l'utilisation a été privilégiée est l'activité électrodermale. Elle permet de différencier les différents états possibles des conducteurs lors d'essais en situations critiques de conduite, grâce à sa sensibilité aux processus cognitifs et à la précocité d'apparition de ses variations. Elle témoigne également de l'état d'attention du conducteur en situation nominale. Elle est enfin aisément utilisable en conduite automobile, et le reflet précis de l'activité du Système Nerveux Autonome (SNA), celle-ci étant étroitement liée à l'activité du Système Nerveux Central (SNC). Il existe d'autres signaux, informatifs sur l'activité du système nerveux autonome dont l'utilisation est possible en conduite nominale ; ceux-ci sont d'origine thermo-vasculaire (température cutanée et débit sanguin cutané) ou cardio-respiratoire (fréquence cardiaque simultanée, fréquence respiratoire).

L'originalité de cette démarche nous permet de quantifier :

- la charge résultant du traitement cognitif lié à une situation particulière
- la durée du traitement cognitif
- le niveau d'activation du conducteur en situation de conduite nominale

Cette approche est donc utile pour des recherches où l'on veut :

- quantifier la charge attentionnelle et/ou émotionnelle associées à une situation particulière ou à l'utilisation d'un système embarqué.
- hiérarchiser en termes de coût physiologique - pour une même situation - différents systèmes d'aide à la conduite, différentes interfaces et, par conséquent, choisir les plus adaptées au client.
- quantifier le coût de la prise en main d'un nouveau système par le conducteur en le comparant à celui associé à l'utilisation habituelle du véhicule sans système.
- quantifier la conduite nominale en termes de niveau d'activation nécessaire ou au contraire de relaxation pour comparer différents véhicules, systèmes ou interfaces.

Toute tâche implique des contraintes pour la réaliser qui peuvent se caractériser objectivement. On peut assez facilement quantifier sa difficulté. L'évaluation se fait par des critères mesurables : par exemple, capacité à réaliser la tâche pendant une durée allouée. En parallèle, le sujet qui y est confronté construit sa propre représentation de ses exigences, autrement dit sa difficulté subjective. La résultante de la difficulté quantifiée et perçue constitue ce que nous appellerons la charge.

III-2- Support neuro-anatomique des manifestations périphériques de l'activité du Système Nerveux Autonome

Dans toute étude comportementale, il est intéressant de pouvoir détailler les différentes phases chronologiques de la transmission de l'information. Or, les études basées sur une approche subjective et même comportementale ne

renseignent que sur ce que l'expérimentateur peut observer, c'est-à-dire le point d'entrée (événement extérieur, stimulus) et de sortie (action, verbalisation du conducteur). Il est pourtant possible d'avoir des informations supplémentaires sur le traitement central. Des mesures facilement accessibles et non invasives, surtout lorsque l'on s'intéresse à un conducteur en action, peuvent être enregistrées en situation de conduite réelle. L'indicateur choisi comme outil d'étude est un signal périphérique, reflet de l'activité du système nerveux autonome.

III-2-A- Inter-relations entre le SNC et le SNA

Le système nerveux est organisé en réseaux, subdivisés en sous-systèmes, central et périphérique (SNC et SNP). Le premier comprend l'encéphale et la moelle épinière ; le second est formé des organes des sens, des voies afférentes et efférentes, ces dernières commandant les effecteurs périphériques. Ainsi, le SNC coordonne les mouvements, contrôle le fonctionnement des organes, régule les émotions et le SNP véhicule les informations sensorielles et motrices. Depuis Bichat (1802), le système nerveux autonome (SNA) est rattaché au SNP. Malgré sa distinction anatomique avec le SNC, leurs fonctions sont intimement liées et les régulations ne sont pas seulement l'apanage du SNC.

III-2-A-a- Distinctions structurelles

Le SNC est entouré par les méninges et est isolé biochimiquement du reste de l'organisme par la barrière hémato-encéphalique. Il est composé de l'encéphale et de la moelle épinière. L'encéphale est contenu dans la boîte crânienne et est constitué du cerveau (télencéphale et diencephale), du tronc cérébral qui est situé sous le cerveau, et du cervelet. La moelle épinière prolonge le tronc cérébral vers le bas, donne naissance aux nerfs rachidiens et contient des fibres afférentes, des fibres efférentes mais aussi un grand nombre d'inter-neurones,

la moelle étant un centre d'intégration et pas simplement un système de liaison reliant l'encéphale au reste du corps.

Par opposition, le SNP est formé de ganglions et de nerfs et fait circuler l'information entre les organes et le SNC dont il met les commandes motrices à exécution. Il est habituellement divisé en deux sous-ensembles : le système nerveux somatique et le SNA. Le système nerveux somatique est celui de la vie de relation, associé au contrôle volontaire des mouvements via l'action des muscles squelettiques et à l'acheminement des messages sensoriels.

Le SNA est celui de la vie végétative et ses régulations ne sont pas accessibles à la conscience. Il innerve l'ensemble des formations effectrices de l'organisme autres que les fibres musculaires squelettiques, c'est-à-dire les muscles lisses qui équipent les parois des vaisseaux et viscères, ainsi que le myocarde, les organes génitaux, les glandes sudoripares et les glandes endocrines. Il répond aux sollicitations du monde extérieur (réaction à une stimulation externe, par exemple) ou anticipe la fourniture énergétique lors de la préparation à l'action (pro action). Il est ainsi responsable de l'homéostasie. Sur le plan sensitif, il traite les informations en provenance de la sensibilité viscérale (pression sanguine, dilatation des intestins...).

III-2-A-b- Double rôle du SNA

Le SNA est divisé en deux sous-systèmes aux fonctions généralement antagonistes : le sympathique (ou orthosympathique) et le parasympathique qui innervent l'ensemble des organes. La plupart est doublement innervée. Les activations sympathiques dépensent l'énergie et facilitent l'action motrice, alors que les parasympathiques, économisent l'organisme et reconstituent ses réserves d'énergie. Ainsi, une domination sympathique augmente le rythme cardiaque, la pression sanguine, la sudation, et l'afflux de sang vers les muscles (notamment ceux des membres) au détriment des viscères. Une domination parasympathique a les effets inverses. Les activations sympathiques ont généralement des effets globaux et de courte durée, elles doivent donc être répétées pour que les effets

se maintiennent). Les effets de l'activation parasympathique sont plus ciblés et prolongés.

Dans l'étude du comportement, il faut distinguer plus précisément ce qui relève du fonctionnement basal de l'organisme, les régulations internes assurant l'homéostasie des réponses ponctuelles à un stimulus interne ou externe. Là, le système répond à la situation par une alerte. En résumé, il y a les régulations constantes (toniques - AED) et les ajustements ponctuels (RED- réponse électrodermale), pour répondre à une situation particulière, et dans lesquels ortho et parasympathiques sont impliqués : ortho pour l'alerte et son effet sur la RED, parasympathique pour l'attention et son effet cardiomodérateur (Porges, 1995 ; Backs, 1998). L'activation générale de l'organisme est bien représentée par l'évolution tonique de l'activité électrodermale, indicateur privilégié de la branche orthosympathique du SNA.

Cette double innervation ne représente pas le seul moyen de contrôle des organes qui subissent aussi des influences hormonales, et certaines fonctions n'échappent pas totalement à la volonté. Par exemple la respiration reste l'œuvre de muscles striés squelettiques dont le contrôle est aussi somatique.

Le système parasympathique ne contrôle pas les glandes sudoripares eccrines et donc de l'activité électrodermale, ce qui fait figure d'exception au principe de la double innervation.

Ces distinctions anatomiques n'impliquent pas que les systèmes nerveux central et autonome soient indépendants. De nombreuses connexions ascendantes aussi bien que descendantes expliquent les capacités de l'organisme à réagir dynamiquement aux modifications de son environnement et/ou à son état interne. Les structures centrales impliquées dans la régulation des fonctions végétatives sont nombreuses. Parmi elles, schématiquement, une boucle classique ascendance/descendance où les structures de plus « bas niveau » (ici, la formation réticulée du tronc cérébral, le thalamus et l'hypothalamus) reçoivent l'information sensorielle, exercent les contrôles de base (maintien des niveaux) et relaient l'information vers des centres limbiques et cognitifs, ces centres

étant en contact réciproque. La résultante en est le contrôle dynamique des variables végétatives, en phase avec l'environnement du sujet et son état interne. Les signes de l'activité du SNA dépendent donc largement de l'activité des structures centrales qui les contrôlent.

1- Rôle de la formation réticulée sur les manifestations périphériques du SNA

Cette structure diffuse s'étend sur toute la hauteur du tronc cérébral (bulbe, pont, mésencéphale) et même au-delà. Elle reçoit des afférences sensorielles provenant de l'ensemble de l'organisme (projetant sur sa partie médiale), des afférences motrices provenant du cortex et du cervelet, et projette ses efférences dans le thalamus (faisceau réticulo-thalamique), et l'hypothalamus.

Elle se subdivise en :

- un système activateur ascendant via le faisceau réticulo-thalamique qui module l'éveil grâce aux stimulations sensorielles ou corticales. Plus l'environnement est riche en stimulations variées, plus l'éveil est maintenu longtemps à un niveau élevé.

- un système descendant qui module le tonus musculaire via la moelle spinale. S'activer physiquement maintient également l'éveil.

La formation réticulée détermine le niveau d'éveil physiologique de l'organisme. Le tonus réticulaire exerce des effets facilitateurs aspécifiques généralisés, observables au niveau central et périphérique (activations neurovégétatives).

2- Rôle du thalamus sur les manifestations périphériques du SNA

Le thalamus est un centre de relais et d'intégration de la plupart des afférences corticales, notamment somesthésiques et sensorielles. On distingue deux systèmes : un spécifique et un diffus. Les connexions corticales du système spécifique projettent sur des aires précises du cortex. Celles du système non spécifique sont diffuses et mal systématisées, touchant l'ensemble du cortex. Les noyaux du système diffus reçoivent massivement leurs afférences de la formation réticulée et projettent à l'ensemble du cortex. Elles sont impliquées

dans le maintien de l'éveil, mais aussi dans l'endormissement (Moruzzi et Magoun, 1949).

3- Rôle de l'hypothalamus sur les manifestations périphériques du SNA

L'hypothalamus est une structure diencephalique. Il est connecté de façon réciproque avec l'hippocampe, la formation réticulée, le thalamus, l'amygdale, le cortex orbito-frontal et le cortex préfrontal. Il échange donc des informations viscérales, somatiques, sensorielles et émotionnelles. Il a un rôle prépondérant dans le maintien des équilibres internes (Critchley, 2002), et est notamment le point de départ des efférences de la sudation thermorégulatrice (Dawson, Schell, & Fillion, 2007). La stimulation de l'hypothalamus postérieur produit un état d'éveil comparable à celui qu'on obtient par la stimulation de la formation réticulée du tronc cérébral.

4- Rôle du système limbique sur les manifestations périphériques du SNA

Les structures limbiques forment un système intégré, assurant la survie de l'individu par l'entremise de réponses viscérales et comportementales adaptées. Le système limbique n'est plus simplement considéré comme dédié aux processus émotionnels, mais le nom a perduré. Il reste quand même le système de l'affectivité, de la mémoire sémantique et épisodique, car on ne mémorise que ce qui a une forte connotation affective. Les travaux récents lui confèrent une fonction importante dans la prise de décision surtout par les régions corticales qui lui sont rattachées et pas seulement par les structures basales qui le constituent. Il inclut, en particulier, l'amygdale qui reçoit des projections des régions sensorielles du thalamus et du cortex, mais aussi de plusieurs autres structures comme l'hippocampe et le cortex préfrontal. Comme c'est le cas avec l'hippocampe, la plupart des voies nerveuses entrantes sont couplées à des voies sortantes. Elles jouent un rôle important sur la manifestation des émotions, particulièrement la peur ; elle favorise l'attention et la perception de stimuli émotionnels, leur mémorisation, stimule la formation réticulée de façon à

provoquer la cascade de réactions physiologiques associées à l'expérience de l'émotion et à la préparation de la réponse comportementale.

5- Le rôle du cortex cingulaire sur les manifestations périphériques du SNA

Le cortex cingulaire se situe sur la face médiale (interne) de chaque hémisphère cérébral, au-dessus de la jonction hémisphérique assurée par le corps calleux. Sa partie antérieure joue un rôle d'interface important entre émotion et cognition, plus précisément dans la transformation des sentiments en intentions et en actions (Mogenson, 1980 ; Paillard, 1987). Il serait impliqué dans des fonctions supérieures comme le contrôle personnel de ses émotions, la concentration pendant la résolution d'un problème, la reconnaissance de nos erreurs, la promotion de réponses adaptatives en réponse à des conditions changeantes (notamment au niveau périphérique).

6- Le rôle du cortex préfrontal sur les manifestations périphériques du SNA

Le cortex préfrontal est fortement connecté au cortex cingulaire et joue un rôle majeur dans les fonctions exécutives. Il est donc particulièrement développé chez l'homme. Sa partie dorsolatérale est très impliquée dans les fonctions cognitives de raisonnement, de planification. Sa partie ventromédiane est davantage liée à la valence émotionnelle de l'information traitée. Les connexions entre cortex ventromédian et système limbique sont très denses. Elles en font une structure idéale pour intégrer le cognitif à l'émotionnel et pour donner un sens à nos perceptions (Damasio et al., 1990).

7- Le rôle du cortex orbitofrontal sur les manifestations périphériques du SNA

Le cortex orbitofrontal entre en jeu dans la sélection des actions, déterminée par les associations apprises, les désirs et les objectifs du sujet, les contraintes physiques et sociales (Bechara et al., 2000). Il est interconnecté avec :

- les cortex associatifs pariétal et temporal, permettant respectivement l'évaluation de l'état corporel et la structuration spatiale de l'environnement,

- le cortex frontal dorsolatéral, permettant la planification des actions,
- l'insula, qui donne accès aux sensations viscérales,
- l'amygdale, permettant d'anticiper les conséquences émotionnelles des actions.

Il envoie, en outre, des projections à l'hypothalamus et au tronc cérébral, modulant ainsi les réponses comportementales et physiologiques périphériques. Par conséquent, les systèmes nerveux central et périphérique autonome sont intimement liés et les réponses végétatives enregistrées lors de tâches exigeant une orientation attentionnelle démontrent que le SNA n'est pas simplement un système répondant automatiquement aux commandes centrales. Selon Hugdahl (1996), le SNA n'est pas simplement un système « non cognitif ».

III-3 – Bref panorama des mesures physiologiques habituellement utilisées.

Les mesures physiologiques sont depuis longtemps utilisées par les équipes de recherche pour qualifier l'état de l'être humain notamment dans les domaines militaire et sportif. On constate, depuis une dizaine d'années, un nouvel intérêt de la part des laboratoires et même des industriels pour ces indicateurs. Les publications scientifiques montrent deux types d'applications des indicateurs physiologiques dans le monde automobile.

1/ outils d'aide à la conception (outils de mesure) pour quantifier l'intérêt et la contrainte d'un système : confort de nouveaux sièges, effort qu'un conducteur devra fournir pour diriger son véhicule, par exemple.

2/ systèmes de surveillance du conducteur pour déterminer son état fonctionnel (attentif, distrait, ou hypovigilant). Le véhicule pourra alors alerter le conducteur et lui proposer un environnement adapté à son état (ambiance lumineuse ou olfactive particulière, affichage du bon niveau d'informations...) ou déclencher des systèmes d'aide ou encore d'alerte.

Quelques publications commencent à s'intéresser, dans ce but, à l'intégration de capteurs physiologiques dans l'habitacle : sur le siège, le volant. L'état du conducteur peut être caractérisé par différentes manifestations physiologiques que l'on peut mesurer (variations du rythme cardiaque, de la fréquence respiratoire, de l'activité cérébrale...). Il existe trois grandes catégories de mesure :

- catégorie des indicateurs périphériques végétatifs (activité cardiaque, respiratoire, électrodermale).
- catégorie des indicateurs périphériques somatiques dont l'électromyogramme (EMG) est principalement utilisé pour quantifier l'effort musculaire fourni aussi bien pour maintenir une posture (activité tonique) que pour effectuer un mouvement (activité phasique).
- catégorie des indicateurs centraux. L'électro-encéphalogramme (EEG) et le traitement qui peut être fait de ce signal, qu'il soit brut (par la méthode de la densité spectrale, par exemple) ou sommé (par la méthode des potentiels évoqués, par exemple) constitue l'outil principal car il reste utilisable à l'intérieur du véhicule.

Toutes ces mesures sont possibles via des capteurs au contact du corps. Seuls les indicateurs du SNA sont susceptibles, pour l'instant, d'être enregistrés via des capteurs déportés (intégrés dans le volant, le siège ou la ceinture par exemple).

Les recherches pour quantifier les différents états du conducteur s'appuient principalement sur l'activité cardiaque, respiratoire et électrodermale. L'EEG est encore utilisé mais son caractère davantage invasif le cantonne à des études sur simulateur de conduite. En revanche, les indicateurs électromyographiques sont utilisés pour étudier le confort, la manœuvrabilité d'un véhicule, et la fatigue posturale.

III- 4 - De la recherche à l'industrie automobile : études menées par les constructeurs s'appuyant sur les mesures physiologiques

Les équipes asiatiques sont les plus nombreuses à s'intéresser aux indicateurs physiologiques et les constructeurs japonais y contribuent de façon non négligeable (Mazda, Nissan, Isuzu, Toyota, Subaru, Honda). Les publications européennes viennent ensuite, avec une forte participation de Renault. Les principaux équipementiers qui publient également sur ce sujet sont : Bosch, Delphi, et Pioneer.

Mazda a beaucoup utilisé l'électromyographie pour tester ses systèmes de confort, comme le montrent les exemples ci-dessous :

- Détection de la fatigue longue durée. (SAE - Society of Automotive Engineers-2001-01-0381)
- Choix de différents muscles pour savoir lequel est le mieux corrélé à la sensation de fatigue longue durée. (SAE -2000-08-0057)
- Quantification de l'effort associé à l'ouverture d'une portière chez les personnes âgées. (SAE 1999-08- 0194)
- Quantification de l'effort d'entrée et sortie du véhicule. (SAE 1999-08-0531)
- Quantification du maintien latéral en virage. (SAE 2000-25-0124).

Une étude s'est appuyée sur l'activité électrodermale pour rechercher un réglage optimum du dossier afin de minimiser l'apparition de l'hypovigilance (SAE 988069).

Subaru a mis en évidence une corrélation entre les performances de maintien sur la voie et le niveau d'éveil du conducteur, mesuré par EEG. (SAE 988411)

Toyota a utilisé l'EMG pour quantifier la fatigue longue durée. (SAE 988412 et 2000-01-0643 et 1999-08-0523)

Isuzu a utilisé plusieurs paramètres du SNA pour des recherches comportementales :

- Fréquence cardiaque, fréquence respiratoire et activité électrodermale pour quantifier l'inconfort acoustique produit par le ralenti moteur (SAE 988412 et 2000-05-0329)
- Fréquence cardiaque, activité électrodermale et EEG pour détecter l'effet des vibrations sur l'endormissement des conducteurs de poids-lourds (SAE 2000-08-0055).

Nissan s'est également intéressé à l'utilisation des signaux physiologiques :

- L'EMG pour quantifier les efforts sur le volant avec un Steer-by-wire. (SAE 2000-25-0124) Le « steer-by-wire » englobe tous les systèmes de direction électro-hydrauliques, ou plus généralement électro-assistés. L'information est donnée aux roues directionnelles via des actionneurs. Ce système agit en augmentant le rayon de braquage des roues, et la fluidité du mouvement des roues.
- La fréquence cardiaque pour évaluer les charges physiques et mentales associées à l'utilisation d'une assistance au maintien dans la voie. (SAE 2001-08-0278)

Chez Renault, on mesure l'activité électrodermale pour quantifier la charge mentale associée à l'utilisation de nouvelles technologies ou nouveaux systèmes tels que l'ABS, l'AFU, le Time Warning, ou les simulateurs de conduite... Ces études seront exposées dans les chapitres suivants, dont certaines seront détaillées.

Pioneer a travaillé sur l'intégration d'électrodes dans le volant pour mesurer la variabilité cardiaque et détecter l'hypovigilance. SAE 2006-05-0009

Delphi s'est intéressé à l'intégration de capteurs dans le siège pour mesurer la variabilité cardiaque et respiratoire et détecter la fatigue, l'hypovigilance, le stress et la charge mentale. SAE 2006-01-1322

Nissan a utilisé l'activité électrodermale, le volume sanguin et la variabilité cardiaque pour quantifier la charge mentale du conducteur (SAE 2005-08-0057).

Nissan a également testé l'EEG et l'Electro-Oculogramme (EOG) pour mesurer l'attention du conducteur. SAE 2006-01-0575 et 2006-05-0060

Honda a retenu la fréquence cardiaque pour caractériser le niveau d'éveil du conducteur. SAE 4-28-2-231

III-5- Choix d'enregistrer l'activité électrodermale (AED)

Les variables neurovégétatives qui permettent via un enregistrement périphérique et non invasif d'avoir accès au fonctionnement cognitif interne du conducteur se regroupent en quelques familles :

- cardiaque et respiratoire, basées sur les mécanismes de régulation du rythme du cœur et de la respiration,
- microcirculatoire, qui traduit les ajustements de la circulation dans les petits vaisseaux sous-cutanés,
- électrodermale, qui traduit les modifications des propriétés électriques de la peau sous l'action des glandes sudoripares eccrines.

Toutes sont enregistrables durant la conduite, mais l'avantage des activités électrodermale et cardio-respiratoire est qu'elles sont relativement indépendantes de la thermorégulation.

Un autre intérêt de l'activité électrodermale est qu'elle ne dépend que du système activateur sympathique, contrairement aux autres organes soumis à la double innervation activatrice sympathique et modératrice parasympathique, comme le montre la figure 10a.

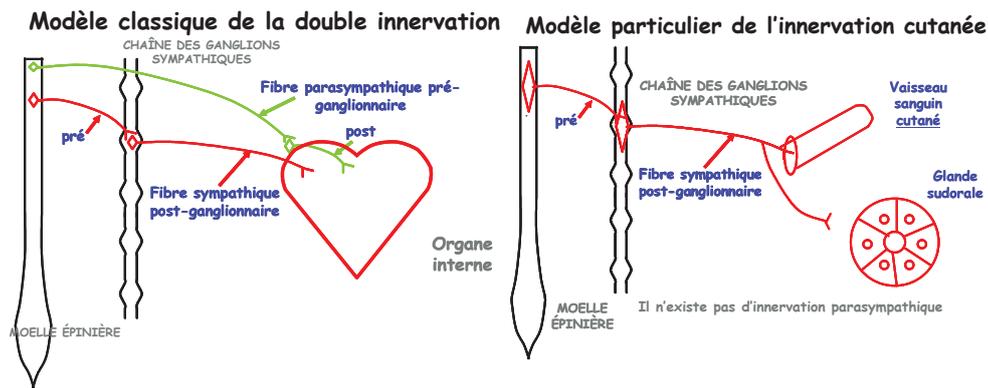


Figure 10a : les deux modèles possibles d'innervation, et la particularité de l'innervation cutanée.

La mesure de l'activité électrodermale ne demande qu'un appareillage électronique simple, embarquable, comportant un boîtier d'acquisition et d'amplification des signaux, un ordinateur pour le piloter et stocker les données, et des capteurs à placer sur le sujet (Clarion et al., 2009 ; Healey & Picard, 2000). Dans le cadre de ce travail, nous resterons donc centrés sur l'activité électrodermale car cette variable est très sensible à des stimuli psychologiquement signifiants (Boucsein et al. 1992) ce qui renforce son intérêt comme indicateur de la charge perçue et de ses variations. Les capteurs de résistance cutanée sont facilement placés sur les phalanges, n'empêchant ni ne perturbant la prise du volant ni l'exécution des gestes ordinaires de conduite. La portabilité, la compatibilité avec la conduite font de l'AED un signal adapté.

Selon Woodworth et al. (1954) et Dementienko et al. (1999), l'activité électrodermale constitue un excellent indicateur pour quantifier le niveau d'éveil d'un sujet. En effet, plusieurs études ont montré qu'une légère augmentation de la conductance de la peau, (ou à l'inverse, une légère baisse de sa résistance), était positivement corrélée (ou négativement pour la résistance) avec une augmentation du niveau d'éveil. Inversement, chez un sujet au repos, une baisse du niveau tonique de la conductance (ou une élévation de celui de la résistance) révèle un état de relaxation (Sostek, 1978, Hastrup et al., 1979).

L'activité électrodermale est également sensible à des stimuli émotionnels, que l'on peut subdiviser en valence émotionnelle (plaisant/positif ou déplaisant

/négatif) et en intensité (Mehrabian et al., 1974, Russell et al., 1980, Lang et al., 1993, Bradley et al., 2000). Plusieurs études l'ont montré, en particulier pour une valence émotionnelle négative, quelle que soit la modalité de présentation considérée (photo, film,...) (Steele et al., 1986, Greenwald et al., 1989, Hubert et al., 1990, Lang et al., 1990, Brand et al., 2000, Royet et al., 2003). D'après la majorité des études, une augmentation de la charge émotionnelle induite par le stimulus ou la tâche à réaliser, provoque une plus forte activité électrodermale (variations toniques et phasiques) (Khalfa et al., 2002, Bradley et al., 1990, Lang et al., 1998, Bradley et al., 2001, Brand et al., 2002, Bensafi et al., 2002). Crundall et al., (2003) montrent des variations significatives de l'activité électrodermale chez les sujets soumis à la visualisation de scènes de conduite dangereuses (situations accidentogènes, poursuites de voitures), comparativement à celle de scènes de conduite neutres. D'autres études ont révélé que l'activité électrodermale constitue un indicateur fiable de l'attention et du comportement attentionnel. Elle reflète les changements rapides du niveau d'attention global du sujet ainsi que l'intensité d'attention focalisée sur un stimulus particulier. Le facteur commun est l'éveil sensoriel (ou activation). La RED est commandée par le système orthosympathique, activateur. Une stimulation va entraîner l'orientation des systèmes sensoriels dans sa direction. Elle est donc à la fois inductrice d'émotion et d'élévation de l'attention.

En effet, l'amplitude des réponses électrodermales augmente fortement pour des stimuli ou des tâches à forte demande attentionnelle (Frith et al., 1983, Kohlisch, 1996).

L'activité électrodermale varie également en fonction de l'intérêt accordé par le sujet à la tâche et du degré de pertinence du stimulus. Quelle que soit la modalité sensorielle utilisée, l'amplitude et la fréquence de la réponse électrodermale sont plus importantes quand elles sont associées à des stimuli qui ont du sens. (Lipp et al., 1998, Bernstein et al., 1969, Siddle et al., 1996, Gati et al., 1996)

La motricité affecte également l'activité électrodermale (Siddle et al., 1996). Elle reflèterait les processus cognitifs de préparation à l'action, permettant la planification et la programmation. Les réponses électrodermales quantifieraient la durée du processus d'information et de la préparation motrice (Collet et al., 1994, Petit et al., 1998).

L'activité électrodermale est un bon indicateur de la charge mentale et de ses variations associées à une situation et/ou à l'utilisation d'un système particulier (Priez et al., 1993 ; Priez et Petit, 1999 ; Collet et al, 2005) ou pour quantifier l'habitation du conducteur à l'usage d'un nouveau système (Collet et al., 2003). Rappelons que la charge mentale comprend une part objective, liée à la difficulté de la tâche et une part subjective, liée à la perception que le sujet s'en fait. C'est cette dernière qui comporte un aspect émotionnel, lui-même lié à l'activation orthosympathique. Le Système Nerveux Autonome (SNA) est connu pour réguler les grandes fonctions vitales et les niveaux d'éveil. C'est surtout le système orthosympathique qui va mobiliser les ressources de l'organisme pour pallier les demandes du milieu intérieur et ajuster le comportement aux exigences du milieu (Boucsein, 1993 ; Vernet-Maury et al., 1993). Les organes internes sont généralement doublement innervés par les branches ortho- et parasymphatiques, lesquelles assurent conjointement l'homéostasie. La peau est aussi un organe et, à ce titre, elle est innervée et vascularisée. Les terminaisons orthosymphatiques cholinergiques innervent les glandes sudorales et permettent la sécrétion de la sueur d'activation, particulièrement au niveau palmaire, plantaire et axillaire. Les terminaisons orthosymphatiques sont ordinairement adrénergiques à quelques exceptions près, dont la peau justement car c'est l'acétylcholine qui active les glandes sudorales palmaires et plantaires. La sueur d'activation se différencie de la sueur de thermorégulation, en premier lieu par la quantité, car elle est produite dans une proportion bien inférieure. Elle n'est pas sécrétée lors des efforts physiques mais plutôt lorsque la charge mentale est importante. La simple montée de la sueur dans le canal excrétoire des glandes sudorales eccrines fait varier les propriétés électriques de la peau, en

particulier sa capacité à conduire le courant électrique, comme l'indique la figure 10b.

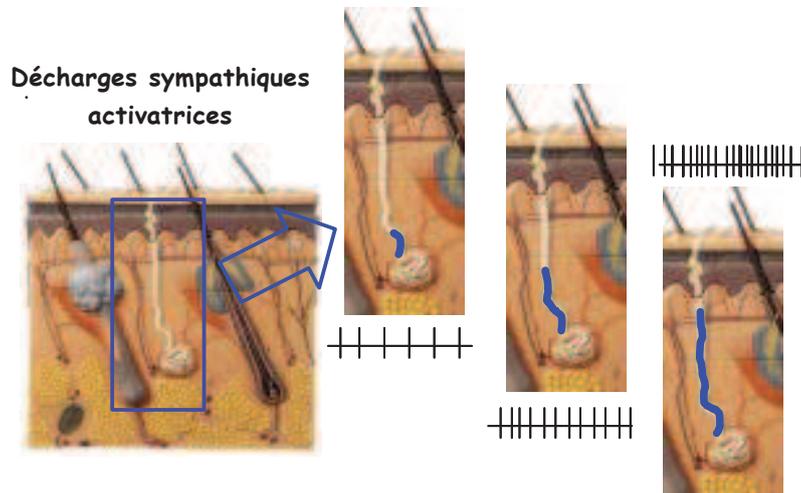


Figure 10b : Principe de fonctionnement de l'activité électrodermale

En injectant un courant imperceptible entre 2 électrodes placées au niveau palmaire, on peut enregistrer indirectement l'activité sympathique puisque les glandes sudorales, activées par les terminaisons nerveuses vont faciliter son passage lorsqu'elles secrètent de la sueur, rendant ainsi la peau davantage conductrice. On mesure les variations de la conductance cutanée (ou son inverse, la résistance).

III-5-A Capteurs et équipements de mesure et d'enregistrement

III-5-A -a- Électrodes

En électrophysiologie, les électrodes standard sont en argent et chlorure d'argent (Ag/AgCl). Elles ont l'avantage de n'être quasiment pas polarisables, ce qui autorise des enregistrements de longue durée en courant continu. Elles présentent aussi les plus faibles potentiels de biais (différence de potentiel entre deux électrodes en l'absence d'application d'une tension entre les deux), ce qui s'accompagne souvent de la plus faible dérive dans le temps (Boucsein, 1992,

pp. 104-105). L'activité électrodermale est mesurée au moyen de deux électrodes Ag/AgCl impolarisables de 30 mm² (Clark Electromedical Instruments, Edenbridge, UK - figure 11a) entre lesquelles on injecte un très faible courant continu de 5 μ A. On peut augmenter l'intensité du courant mais il faut également utiliser des électrodes d'une surface plus grande afin de maintenir une densité de courant inférieure à 10 μ A/cm². Selon les recommandations traditionnelles (Fowles et al., 1981), les capteurs devraient être placés sur la partie interne de la seconde phalange de l'index et du majeur de la main non dominante. Nous avons néanmoins choisi de les placer sur la 3^e phalange de ces mêmes doigts de manière à ce que le fait de tenir le volant ne parasite pas les signaux, du fait de l'élévation de la pression sur l'électrode (figure 11b). Dans des études préalables en laboratoire, nous avons montré que les signaux enregistrés sur les deux emplacements étaient comparables. Les capteurs sont fixés sur le doigt avec une bande adhésive après avoir été remplis d'un gel conducteur isotonique (c'est-à-dire dont les propriétés électriques se rapprochent de celles de la peau). L'activité électrodermale est mesurée avec un courant constant entre 5 et 15 μ A. Une méthode à tension constante existe également mais elle présente une fiabilité inférieure, en particulier lors d'enregistrements multiparamétriques, que nous effectuons généralement. Une fois l'acquisition effectuée, nous exprimons les valeurs en résistance (k Ω) ou en conductance (μ S). Celle-ci reste donc indépendante de la méthode de mesure, à courant ou à tension constante.



Figure n°11a : Electrode utilisée pour enregistrer le signal électrodermal.

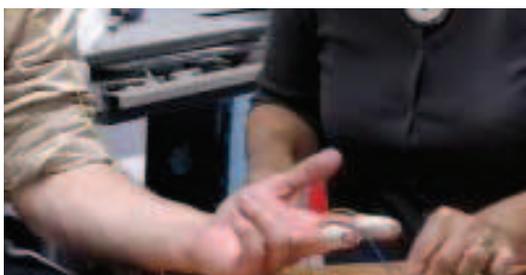


Figure n°11b : mode de fixation des électrodes d'enregistrement de l'activité électrodermale.

III-5-A -b- Gel électrolytique

Le gel facilite la continuité électrique entre la peau et l'électrode, sans quoi le rapport signal/bruit serait plus faible. Il contient des ions dont la concentration est supérieure à celle de la peau et, pour cela, il est dit hypertonique. Cela modifie l'état des membranes et, donc, le comportement électrique de la peau. De la même façon qu'il faut s'abstenir d'abraser la peau pour la préparer alors que c'est une opération courante en électrophysiologie, il ne faut pas utiliser un gel hypertonique pour mesurer l'activité électrodermale, mais un produit isotonique qui modifie beaucoup moins les caractéristiques de la peau. La plupart des gels vendus dans le commerce sont destinés aux utilisations les plus communes, ECG, EEG, EMG. L'enregistrement de l'activité électrodermale requiert donc un produit spécifique.

III-5-A-c- Enregistrements

Les données physiologiques, mécaniques (issues du véhicule) et vidéo (le visage du conducteur, ses pieds sur le pédalier, ses mains sur le volant la scène routière avant à l'aide de quatre caméras) sont recueillies et synchronisées, depuis 2006 via la plateforme UNOTECH (Utilisation de Nouvelles Technologies d'aide à la sécurité) développée dans le cadre d'un projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) du même nom. Ces quatre prises de vue sont réunies sur un même écran via un quad (figure n°12c). Grâce à elles, on peut suivre le comportement

des conducteurs en temps réel (appuis sur les pédales, positionnement des pieds, actions des mains, appuis sur les commandes, orientation du regard, expressions du visage et mimiques faciales) et les mettre en relation avec les événements de conduite et les variables physiologiques. L'activité électrodermale est donc enregistrée en continu.



Figure 12 : Le module d'acquisition des données vidéo

À gauche (Fig. 12a), positionnement de la caméra vidéo filmant l'action sur les pédales. Au centre (Fig.12b), l'ensemble du système d'acquisition des données vidéo. A droite, (Fig.12c), exemple de données obtenues sur l'écran 'quad'. En haut, à gauche, on observe l'action du conducteur sur les commandes au volant. En haut à droite, on peut suivre la direction du regard, en particulier les prises d'information dans les rétroviseurs intérieur et extérieur. En bas, à gauche, la vue de la situation de conduite permet d'y référer les actions. Enfin, en bas à droite, on suit en temps réel les actions sur les commandes au pied.

Une fois le conducteur installé dans la voiture, et l'ensemble des enregistrements fonctionnels, on procède à l'enregistrement d'une phase référence au repos (yeux ouverts et fermés) d'au moins une minute. En cas de besoin, elle permettra de normaliser les valeurs enregistrées au cours de la conduite pour chaque conducteur en les rapportant à sa période de référence. En effet, compte tenu des importantes variations inter individuelles, on ne peut comparer ces signaux que si les valeurs sont normalisées.

III-5-B- Analyse du signal électrodermal

En situation nominale, l'activité électrodermale fluctue légèrement autour d'une ligne de base dont la valeur moyenne indique le niveau global d'éveil d'un individu. L'interprétation de ses variations peut se faire grâce à son activité tonique et phasique. La première correspond à des variations à long terme de la valeur de base. Elle est fortement corrélée aux variations de l'éveil physiologique de l'organisme (Collet et al., 1999). La résistance cutanée diminue quand le sujet s'active, et on a la relation inverse avec la conductance. L'activité phasique de la résistance se traduit par une chute rapide du signal en association avec un stimulus. Comme toute réponse physiologique une réponse électrodermale est quantifiée par son amplitude et sa durée. Plusieurs indices temporels ont été proposés, en particulier la durée de retour à la valeur de base. Compte tenu de l'inertie du signal et de sa sensibilité à toute stimulation, un autre indice se révèle bien plus fiable (Vernet-Maury et al., 1995). La durée pendant laquelle le sujet répond au stimulus définit la DPO (durée de perturbation ohmique) qui correspond à la période pendant laquelle le sujet reste sous l'influence du stimulus (figure 13). Elle traduit finalement la durée du traitement de l'information. Cet indice est plus fiable que la mesure de l'amplitude de la réponse, dont la valeur peut être dépendante de la valeur initiale (Furedy et Scher, 1989). La réponse électrodermale reflète l'intégration de processus cérébraux comme la réponse cognitive au stimulus (Hugdahl, 1996).

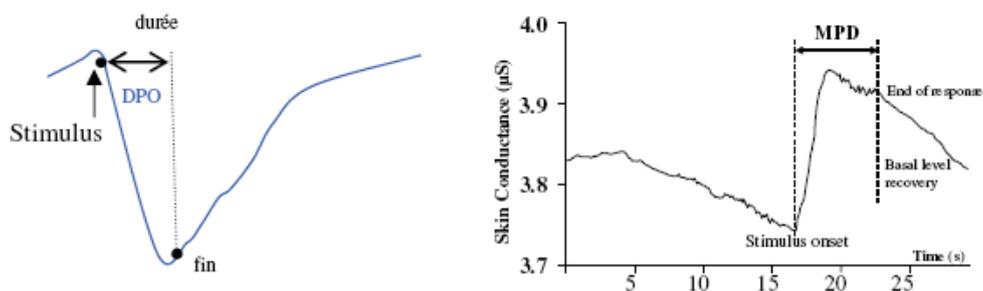


Figure n° 13 : Réponse type de l'activité électrodermale à un stimulus -en résistance- sur la partie gauche (schématisation) et en conductance à droite (enregistrement en réponse à un freinage d'urgence devant obstacle en conduite automobile). La durée des réponses est comparable et la DPO peut être utilisée indifféremment pour exprimer la durée d'une réponse électrodermale, qu'elle soit exprimée en résistance ou conductance.

On peut également quantifier l'occurrence de la réponse. Lorsqu'un même stimulus est répété plusieurs fois, le nombre d'occurrences par rapport au nombre de stimuli est un bon indicateur de la charge engendrée par ce type de stimulus.

III-6- Quelques exemples d'enregistrement d'indicateurs électrodermaux lors de conduite avec interface

Avant de détailler dans les chapitres IV et V l'utilisation de systèmes d'aide et/ou de sécurité ayant trait à la régulation longitudinale, on exposera ici brièvement quelques autres études ayant bénéficié de la double approche comportementale et physiologique pour mieux comprendre le comportement du conducteur :

Analyse physiologique du comportement de chauffeurs de bus découvrant un nouveau système d'aide à l'accostage.

L'analyse de l'activité électrodermale a permis de quantifier la charge induite par la prise en main du système d'aide, et de hiérarchiser le coût cognitif associé à des pannes potentielles, pannes répertoriées par le département de sûreté de fonctionnement. (Collet et al., 2003)

Analyse physiologique du comportement de conducteurs ordinaires découvrant un nouveau système d'aide au maintien de la distance de sécurité inter véhicule.

Ce système était associé à 3 interfaces possibles que l'on voulait tester, informant le conducteur sur sa distance de sécurité avec le véhicule le précédant. L'analyse conjointe de l'activité électrodermale et du comportement de conduite a permis de montrer que l'alerte haptique était la plus efficace car rapidement perçue sans générer de coût cognitif supplémentaire, en comparaison à celles associées aux alarmes plus « conventionnelles », visuelle et sonore (Petit et al., 2004).

Analyse physiologique du comportement de conducteurs ordinaires soumis à différentes double tâches.

L'analyse des réponses électrodermales a permis de quantifier la charge associée à la conversation téléphonique, avec passager, ou l'écoute de la radio. Une conversation avec passager entraîne une charge comparable à une conversation avec un correspondant téléphonique (Collet et al., 2009).

La publication des 3 études précédentes figure en annexe (chapitre VIII).

IV Utilisation de systèmes de régulation longitudinale : intérêt de la mise en situation

IV-1 - Exemple du régulateur de vitesse

IV-1-A- Utilisation en conduite nominale

IV-1-A-a- Objectif

L'objet de ce travail a été d'améliorer notre connaissance des comportements du conducteur vis-à-vis du régulateur de vitesse. Normalement conçu pour faciliter sa tâche, ce système d'aide nécessite néanmoins que le conducteur interagisse avec lui. En effet, il doit lui donner des instructions en utilisant différentes commandes, le surveiller en cours d'usage via des informations fournies sur le tableau de bord, et reprendre la main si besoin. Une tâche secondaire s'ajoute alors à la tâche principale de conduite, ce qui suppose un partage de l'attention. La conséquence non souhaitée est de placer le conducteur en double tâche et d'augmenter la charge mentale globale, résultant du contrôle simultané des deux tâches. L'étude des interactions homme-machine montre qu'il est parfois possible d'obtenir un effet inverse à celui initialement souhaité, augmenter la charge globale au lieu de l'alléger. Nous avons précédemment démontré que ce n'est qu'après une période d'apprentissage que le système devient réellement opérationnel, en abaissant éventuellement la charge mentale du conducteur (Collet et al., 2003). Il est donc nécessaire d'apprendre à interagir avec le nouveau système dont l'utilisation ne deviendra automatisée qu'après familiarisation ou apprentissage.

Au début 2000, des possesseurs de véhicules équipés de régulateurs de vitesse ont eu des difficultés d'utilisation de ces systèmes. Ils avaient pourtant été testés avec leur interface, puis validés par les concepteurs et ingénieurs. Leur mode de fonctionnement n'était pas à remettre en cause. Pourtant, il semblait qu'au final, l'utilisation qui en était faite n'était peut être pas exactement celle

prévue par le concepteur. Il a donc fallu étudier la réelle utilisation qui en était faite.

IV-1-A-b- Le système d'aide

Le régulateur de vitesse permet au conducteur de maintenir sa vitesse de croisière constante et sans effort. L'objectif du concepteur est donc d'améliorer le confort de conduite tout en incitant le conducteur à respecter les limitations de vitesse. Lorsque la circulation le permet, notamment lorsqu'elle est fluide, le régulateur évite la fatigue des longs trajets, en maintenant une vitesse prédéfinie et conforme à la réglementation en vigueur, sans avoir à maintenir un appui sur l'accélérateur.

La littérature offre peu de travaux consacrés à l'usage du régulateur. Cependant, la majorité montre que son utilisation n'a pas d'effet négatif sur le comportement du conducteur et sur sa sécurité. Selon Christ et al., (2000), les conducteurs ne sont pas moins attentifs à la conduite. Par ailleurs, allure moyenne et distance inter-véhicule restent compatibles avec la sécurité (Patterson, 1998). La fatigue accumulée dans les jambes par les longs trajets diminuerait. À l'inverse, quelques études révèlent que conduire avec un régulateur aurait des effets négatifs sur la conduite. La programmation et la déprogrammation fréquentes du système, nécessaires à l'ajustement de la vitesse au trafic, auraient comme conséquence d'ennuyer et de gêner le conducteur (Youngbin, 1997). On peut extrapoler qu'il va différer ces régulations et ainsi prendre davantage de risque, en respectant moins les distances de sécurité, par exemple.

Quand le régulateur est activé, le conducteur n'agit plus sur l'accélérateur et le système- détaillé en figure 14- se substitue à lui pour conserver la vitesse de consigne demandée ; par contre, il peut moduler sa consigne avec les touches [+] ou [-] sur le volant, de manière à incrémenter ou décrémente la vitesse de consigne. Les touches [+] et [-] ne sont pas complètement équivalentes : si l'appui sur le [+] permet d'accélérer, l'appui sur le [-] ne le fait pas freiner mais

simplement décélérer de 2 km/h. C'est uniquement par action sur le frein moteur, donc pas avec un résultat immédiat, que la demande de baisse de la vitesse de consigne atteindra petit à petit la valeur demandée. Le conducteur peut reprendre le véhicule en main dès qu'il le souhaite par diverses opérations (appui sur le frein, sur le bouton de remise à zéro, sur l'embrayage, sur l'interrupteur principal, en passant au point mort). N'importe laquelle de ces actions passera la consigne antérieure en mémoire ; elle pourra être réactivée par un nouvel appui sur la touche [R] au volant. En attendant, la gestion de la vitesse redevient nominale, en dosant l'appui sur l'accélérateur. Une autre vitesse de consigne pourra également être demandée en appuyant sur la touche [+] au moment où la nouvelle vitesse de croisière conviendra au conducteur.

Quand le régulateur est activé et que la vitesse correspond à la consigne, le conducteur peut ponctuellement appuyer sur l'accélérateur pour augmenter sa vitesse (pour dépasser un véhicule par exemple) sans pour autant désactiver la consigne. Il se retrouve en mode appelé « *over ride* », tant qu'il n'aura pas lâché le pied de l'accélérateur et rejoint la vitesse de consigne. Pendant ce processus, un retour visuel clignotant au tableau de bord l'informera. S'il ne veut pas modifier sa vitesse de croisière, il ne devra pas poser son pied sur l'accélérateur. Enfin s'il désire réellement freiner, et ne pas seulement décélérer, il peut quitter le mode régulé à tout instant en appuyant sur la remise à zéro du volant ou sur le frein.

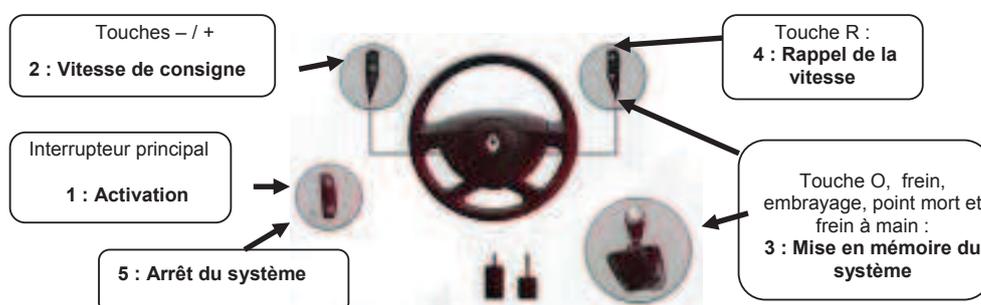


Figure 14 : descriptif du système de régulation et des différents actuateurs.

IV-1-A- c - Apport de la démarche proposée.

Cette étude a pour objectif d'analyser le comportement et les stratégies des conducteurs utilisant le régulateur de vitesse en situation nominale, au travers de méthodes ergonomiques (analyse de l'activité) et d'indicateurs physiologiques (Activité électrodermale, résistance cutanée). Plusieurs campagnes d'essais ont été menées sur autoroute, en utilisant l'une ou l'autre des deux approches, dans le but :

- de mieux connaître l'usage du régulateur de vitesse, en particulier en fonction de son niveau d'expertise du système.
- de s'assurer que son usage n'entraîne pas de mauvais positionnement de pieds et des mains.
- de savoir si la conduite en vitesse régulée entraîne une baisse de l'éveil.

IV-1-A- d - Protocoles expérimentaux.

Enregistrements

Les premiers essais se sont intéressés à l'interaction conducteur / régulateur et n'ont nécessité que des caméras pour enregistrer les mouvements des mains et des pieds. Les essais suivants ont intégré les données physiologiques et mécaniques.

Les données physiologiques (résistance cutanée), cinématiques et vidéo ont été recueillies et synchronisées via la plateforme UNOTECH. On a recueilli la vitesse courante du véhicule et l'état du régulateur (instants de connexion / déconnexion, modes actif / passif du système). Quatre caméras vidéo enregistraient la scène routière avant et l'habitacle. Une image unique était projetée sur un même écran via un quad, permettant de retracer exactement le comportement des conducteurs : appuis sur les pédales, positionnement des pieds, actions des mains, appuis sur les commandes du régulateur, orientation du regard, expressions du visage et mimiques faciales. L'activité électrodermale était également enregistrée en continu.

IV-1-A- e - Première campagne d'essais pour connaître la position du pied droit lorsque le régulateur de vitesse est activé

Quinze conducteurs, habitués à utiliser le régulateur de vitesse, ont été volontaires pour tester deux véhicules parmi les trois étudiés : une Laguna, une Mégane berline, une Mégane Scénic. Le trajet choisi était un aller-retour entre deux sites techniques de Renault, séparés d'environ 100 km dont une grande majorité d'autoroute (A13). L'aller se faisait à bord d'un véhicule et le retour à bord du second. Les sujets ont eu pour consigne de passer le plus de temps possible en régulation (30 mn au minimum sur chaque trajet), ce qui était tout à fait adapté à la portion de route utilisée et à la densité de circulation.

Position du pied droit :

Au dessus de la Pédale de frein Mégane = 0% Scénic = 0% Laguna = 6%	Au dessus de la Pédale d'accélérateur Mégane = 0% Scénic = 23% Laguna = 15%
Sous la Pédale de frein Mégane = 25% Scénic = 0% Laguna = 0%	Sous la Pédale d'accélérateur Mégane = 0% Scénic = 0% Laguna = 7%
Zone avant de la cave à pied proche de la pédale de frein Mégane = 13.5 % Scénic = 19% Laguna = 28%	Zone avant de la cave à pied proche de la pédale d'accélérateur Mégane = 45.25 % Scénic = 39% Laguna = 18 %
Zone arrière gauche de la cave à pied proche du siège Mégane = 0.75% Scénic = 6% Laguna = 15 %	Zone arrière droit de la cave à pied proche du siège Mégane = 15.5% Scénic = 13% Laguna = 11 %

Tableau 1 : Positions du pied droit repérées par caméras quand le régulateur est activé, en fonction du type de véhicule. Seule une faible proportion conserve une position ne favorisant pas le repos (pied au dessus d'une pédale). Le total correspondant à chaque véhicule est de 100%. La « cave à pieds » est l'espace disponible compris entre les pédales et le siège du conducteur.

Les positions privilégiées sont proches des pédales, quelle que soit la voiture (tableau n°1). Le Scénic - seul monospace - permet la position la plus sûre du pied droit puisque dans 81% du temps, il est à proximité de la pédale de frein (cave à pied avant ou au-dessus de la pédale d'accélérateur, position dans laquelle le

temps de mouvement est le plus faible). La verbalisation des participants montre également qu'ils préfèrent le Scénic à la Mégane berline et à la Laguna pour le confort de la jambe droite.

Ces enregistrements sont particulièrement rassurants, car on aurait pu craindre que les conducteurs adoptent des positions de pied droit peu compatibles avec la sécurité, entraînant la perte du référentiel accélérateur-frein et, par conséquent, une augmentation probable des temps de réaction et de mouvement en cas de reprise en main nécessaire du système.

IV-1-A-f- Deuxième campagne d'essais : Étude des interactions des conducteurs avec le régulateur de vitesse

Population de l'étude et déroulement d'un essai

Dix-neuf conducteurs âgés de 26 à 43 ans (moyenne =30 et écart type = 4.4) ont conduit 130 kms sur autoroute avec un trafic léger, accompagnés d'un copilote en position de passager avant et d'un expérimentateur comme passager arrière. Le fonctionnement du régulateur de vitesse était expliqué dans le véhicule, avant de partir, pour la première fois pour certains, ou rappelé pour d'autres. Les participants ont été regroupés en fonction de leur familiarité d'usage du régulateur : 10 d'entre eux étaient familiarisés à son usage, 6 l'avaient déjà un peu utilisé et 3 le découvraient. Ces deux derniers groupes ont été rassemblés, compte tenu de leur effectif. La consigne était d'utiliser le régulateur pendant la moitié du parcours et de conduire sans l'autre moitié (celle ci étant considérée comme référence ou conduite nominale). Les 130 kms se répartissaient sur une phase aller-retour de conduite sur l'autoroute A13 entre Rocquencourt et Evreux. L'ordre des deux sessions a été contrebalancé : aller sans régulateur et retour avec pour la moitié des sujets et inversement pour l'autre moitié. Les essais ont tous eu lieu en milieu de journée pour s'assurer de la faible densité du trafic. Néanmoins, celui-ci pouvait varier entre le début et la fin de la conduite. L'utilisation du régulateur de vitesse étant fortement dépendante du trafic et, pour éviter tout biais, les données ont été traitées de

manière à ce que chaque période d'utilisation du régulateur soit comparée à une période comparable de conduite nominale, - du point de vue de la densité du trafic. Le véhicule d'essais utilisé pour cette campagne sur autoroute était une Renault Laguna.

Résultats

Stratégies d'activation /désactivation

Toutes les actions sur le régulateur ont été répertoriées et catégorisées. Pour un trajet de 65 kms, les conducteurs ont activé et désactivé leur système 16 fois en moyenne, avec un nombre plus important pour les novices que pour les expérimentés. Dans les deux groupes, les activations sont également réparties sur les touches [R] et [+]. (Tableau 2).

Trajet de 65 kms avec régulateur	niveau de familiarisation avec RV	Nombre d'activations du régulateur	Nombre d'activations avec [R]	Nombre d'activations avec [+]
Moyenne tous sujets	52%E, 16%I, 32%N	16	8	9
Moy groupe expérimentés	100% E	13	6	7
Moy groupe intermédiaires et novices	66% N et 33% I	20	10	10

Tableau 2 : stratégies d'activation suivant le niveau d'utilisation du régulateur. E : expérimentés - I : intermédiaires - N : novices.

Les désactivations, dont le taux est comparable à celui des activations, se répartissent de façon égale sur le frein et la touche [O] pour les participants expérimentés, alors que les novices/intermédiaires privilégient la touche [O] (tableau 3).

Trajet de 65 kms avec régulateur	Niveau de familiarisation avec RV	Nb total de désactivations du régulateur	Nb de désactivations avec le frein	Nb de désactivations avec [O]	Nb de désactivations avec l'embrayage
Moyenne tous sujets	52%E, 16%I, 32%N	16	8	8	1
Moy groupe expérimentés	100% E	13	6	6	0,5
Moy groupe intermédiaires et novices	66% N et 33% I	20	8	11	1,5

Tableau 3 : stratégies de désactivation suivant le niveau d'utilisation du régulateur

Lorsque le régulateur était activé, une moyenne de 125 appuis sur les touches [+] et [-] a été constatée pour ajuster la vitesse de consigne ; elle est le double dans le groupe novices/intermédiaires que dans le groupe expérimentés (tableau 4).

Trajet de 65 kms avec régulateur	Niveau de familiarisation avec RV	Nombre d'appuis sur + / - pour ajuster la vitesse de consigne
Moyenne tous sujets	52%E, 16%I, 32%N	125
Moy groupe expérimentés	100% E	81
Moy groupe intermédiaires et novices	66% N et 33% I	190

Tableau 4 : Stratégies d'ajustement de la vitesse de consigne

Effet de l'habitude à utiliser le régulateur de vitesse sur le coût physiologique associé à son utilisation

Nous nous intéressons plus particulièrement aux situations où le Temps Inter Véhiculaire (TIV) diminue, ce qui arrive dans deux situations particulières : arrivée de son véhicule sur un autre, plus lent ; et insertion d'un autre véhicule devant le sien.

La nécessité d'adapter la vitesse s'accompagne-t-elle d'un coût physiologique plus important avec régulateur qu'en mode manuel, étant supposé qu'il faille reprendre la main ? Ces différences entre mode régulé et mode manuel, si elles existent, sont-elles accentuées par l'expertise du conducteur ?

L'élévation de la charge attentionnelle associée à toute action est facilement repérable et quantifiable grâce à l'apparition potentielle de réponses électrodermales dépassant l'activité spontanée. Aussi bien le nombre que la durée des réponses témoigne d'une élévation de charge. Nous avons répertorié des situations similaires où les conducteurs devaient interagir avec le système pour abaisser leur vitesse, suite à l'arrivée sur un véhicule plus lent, pour comparer la charge induite par ce type d'action suivant l'expérience du conducteur à l'usage du régulateur. Les figures 15 et 16 résument la situation. Pour une série d'interactions similaires, par exemple, une désactivation du système par frein ou embrayage, rapidement suivie d'une réactivation par appui sur la touche [+], la charge attentionnelle associée sera très différente selon l'expertise du conducteur. Un novice présentera des réponses électrodermales marquées, associées à ces deux actions, réponses caractéristiques d'une activation du système d'alerte (figure 15).

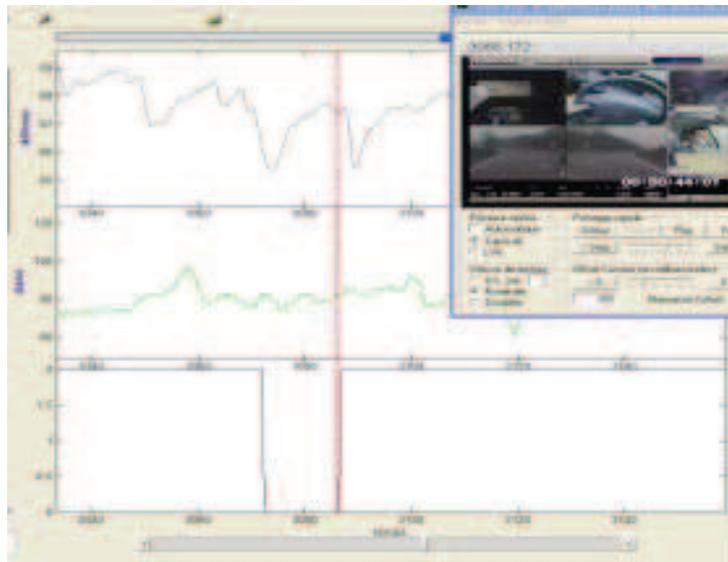


Figure 15 : Désactivation par frein et Activation par appui sur (+) : sujet novice, coût physiologique notable associé à chaque action.

La courbe du bas montre l'instant d'appui sur le frein qui entraîne la sortie du mode régulé, puis l'appui sur le bouton (+) (au niveau des pointillés rouges) qui permet de revenir en mode régulé. En parallèle, on voit l'action de l'appui sur la photo du conducteur. Les deux actions (appuis sur frein puis sur bouton (+)) s'accompagnent d'une réponse électrodermale qui se différencie nettement du niveau de base.

À l'inverse, un conducteur habitué à l'usage du régulateur présente un signal électrodermal très peu perturbé, correspondant à une conduite largement automatisée (figure 16).

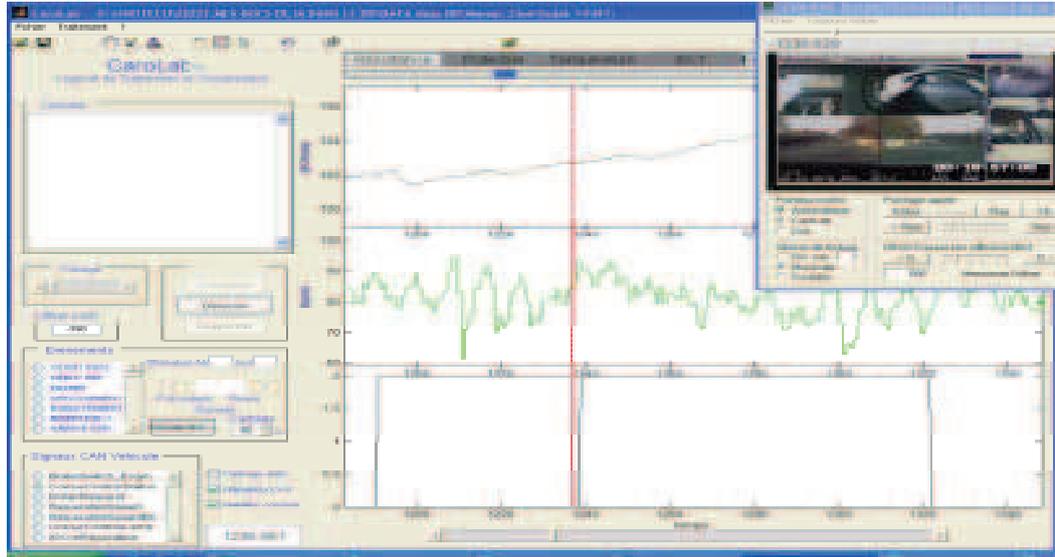


Figure 16 : Désactivation par Embrayage suivie d'une activation par appui sur (+): sujet expert. Le coût physiologique associé est très faible (absence de réponses électrodermales successives. On note néanmoins une diminution de l'arythmie sinusale respiratoire sur le signal cardiaque entre 1240 et 1280 s ce qui atteste une élévation de l'attention.

Comparaison du niveau d'éveil en conduite avec et sans régulateur de vitesse

Le niveau d'éveil est quantifié au moyen de trois facteurs extraits du signal électrodermal :

- La valeur moyenne de la résistance cutanée.
- Les variations autour de cette valeur moyenne (écart type de la variable).
- La fréquence des réponses électrodermales (nombre par minute).

Nous avons d'abord examiné les variations inter-sujets, puis les évolutions (comparaison intra-sujet) afin d'identifier des profils individuels. Les paramètres physiologiques ont été extraits par périodes de 10 secondes, au cours des deux séquences de conduite.

Analyse Inter-sujets

Il n'existe aucune différence entre le nombre de réponses électrodermales du trajet en conduite nominale et en mode régulé ($t = 0,69$, $p = .50$, NS). Les nombres moyens de réponses étaient respectivement de 1,96 et 1,8 par minute.

L'activité électrodermale moyenne n'était pas non plus significativement différente entre les deux trajets : $75.4 \text{ k}\Omega$, vs $77.1 \text{ k}\Omega$. La figure 17 résume les résultats.

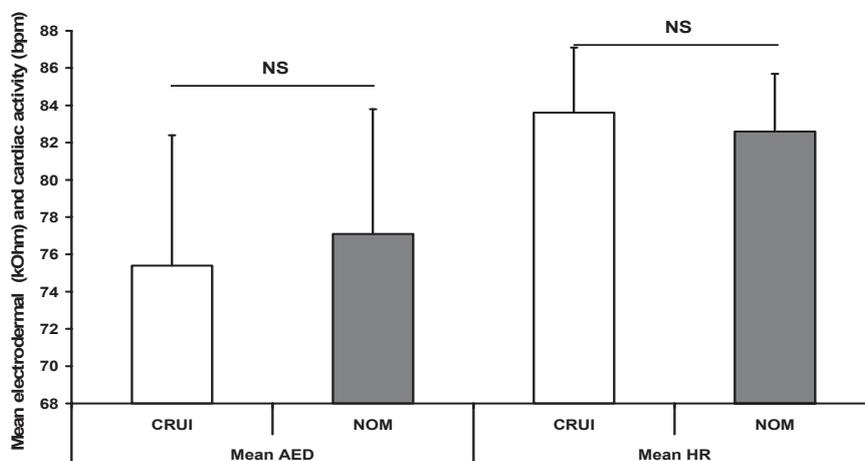


Figure 17 : Activité électrodermale moyenne pendant les deux conditions. Aucune différence n'a émergé en comparant des valeurs toniques physiologiques avec et sans l'utilisation du régulateur. CRUI : condition régulateur - NOM : condition conduite nominale. Les mêmes observations sont faites sur les données cardiaques.

Analyse Intra-sujet

Pour la plupart des conducteurs, le niveau de la résistance cutanée a diminué pendant la conduite avec régulateur. 32% des participants ont un niveau d'éveil plus élevé avec l'utilisation du régulateur, alors que 18% sont plus activés en conduite nominale. ($\text{Chi}^2=3.83$, $P=.049$, avec correction de Yates).

À l'inverse, les conducteurs se relaxent davantage en conduite nominale (37%) comparativement à la conduite avec régulateur (13 %). La figure 18 résume ces résultats.

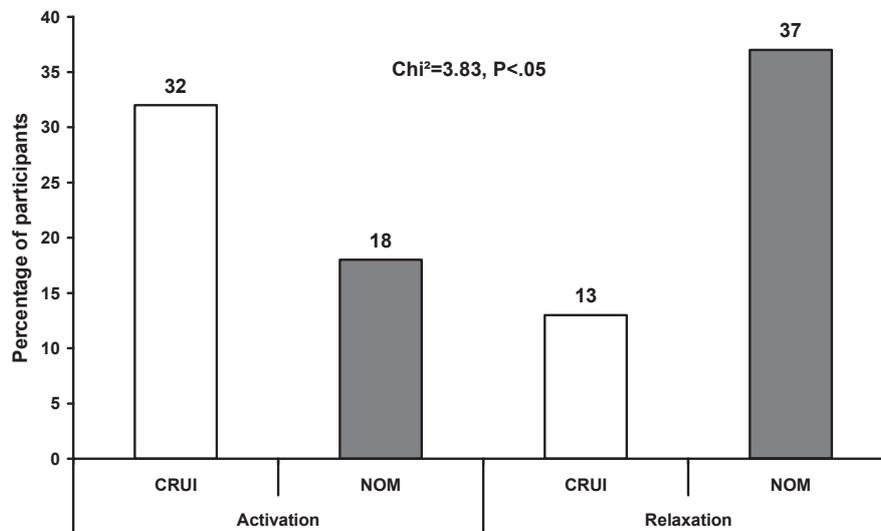


Figure 18 : Proportion de participants qui s'activent (côté gauche) et se relaxent (côté droit) en fonction de la situation de conduite. CRUI: avec régulateur de vitesse - NOM: en conduite nominale

Conclusions

Les interactions du conducteur avec le régulateur dépendent de l'habitude qu'il a d'utiliser ce système. Les conducteurs qui maîtrisent son utilisation ont moins besoin d'interagir avec lui que les novices ; les actions sont faites à bon escient et ne nécessitent pas de continuelles réadaptations comme le font les novices. Par exemple, un novice peut appuyer plusieurs fois sur la touche (+) pour augmenter sa vitesse alors qu'il se rapproche d'un véhicule plus lent et doit donc, dans la foulée, désactiver le système et adapter sa vitesse en freinant. Cela témoigne d'un manque d'anticipation et d'une mauvaise interaction, coûteuse en attention, car nécessitant une réadaptation à la situation de conduite.

Toute interaction avec le régulateur s'accompagne d'un coût attentionnel dépendant de l'expertise du conducteur : pour un habitué à l'usage du système, toute interaction avec lui a été automatisée, comme de nombreuses autres actions chez un conducteur entraîné. Au contraire, pour le novice, toute interaction avec le régulateur nécessite un traitement cognitif en phase

d'apprentissage. C'est ce que l'on observe également chez les jeunes conducteurs pour toute autre action de conduite, non encore automatisée.

Le régulateur de vitesse a été supposé induire une somnolence parce que le conducteur lui délègue une fonction qu'il remplit habituellement. Cet impact a, en fait, été peu étudié. Cela est probablement dû à un manque de données objectives. Les indicateurs du Système Nerveux autonome (SNA) ont permis de mettre le contraire en évidence. La troisième hypothèse - la conduite en vitesse régulée entraîne une baisse de l'éveil - est donc infirmée puisque l'usage du régulateur n'entraîne pas de dégradation du niveau d'éveil du conducteur. Il présente un niveau d'éveil comparable, lors de la conduite nominale ou avec régulateur : en effet, la fréquence des réponses électrodermales était comparable dans les 2 conditions.

Cette étude apporte des nouvelles connaissances sur l'interaction du conducteur avec un système d'aide à la conduite, comme le régulateur de vitesse. Sur un trajet d'environ une heure, son usage n'entraîne pas de différence sur le niveau d'éveil, ni dans le sens d'une dégradation (potentiellement due à la délégation), ni dans le sens d'une surcharge mentale (potentiellement due à la surveillance du système).

IV-1-B- Utilisation d'une nouvelle interface liée au régulateur en phase de découverte

IV-1-B-a - Proposition d'une IHM innovante

Le Département Electronique de la Direction de la Recherche de Renault a mis au point trois systèmes de repose-pied sur la pédale d'accélérateur, proposés au conducteur quand il utilise le régulateur de vitesse, dans un but double :

- améliorer son confort en proposant une position supplémentaire pour le pied droit,

- améliorer sa sécurité en permettant de conserver le pied droit en position habituelle, non loin du frein pour pouvoir agir au plus vite en cas de besoin.

Ces solutions techniques ont été prototypées. Une ne nécessitant pas de pédale active car le repose pied est fixe (système A) et le concepteur aura choisi la position du point dur de manière prédéterminée. Les deux autres nécessitent une pédale active mais réglées différemment : système B et système C. Pour des raisons de confidentialité, leur structure et fonctionnement ne sont pas détaillés ici. Néanmoins, ils induisent des différences perceptives (haptiques).

Le repose pied A durcit l'accélérateur en un point prédéterminé une fois le régulateur activé. La pédale se transforme ainsi en repose pied droit. Le conducteur sait qu'il utilise le régulateur tant qu'il perçoit ce point dur. Pour accélérer, il suffit qu'il le dépasse en appuyant fortement sur la pédale³. Le régulateur est toujours activé et la pédale reprendra sa configuration initiale lorsque le conducteur relâchera la pression. Le point positif est qu'il sait à tout moment quand son régulateur est activé. En revanche, la position du point dur étant déterminée, il aura fallu au préalable trouver l'appui le plus adapté à toutes les anthropométries.

Les repose pieds B et C sont construits sur deux techniques différentes, tous deux avec la particularité de faire varier le point dur en fonction de la vitesse de consigne donnée au véhicule. La position du pied peut donc varier au cours du trajet, ce qui pourrait être source d'incompréhension de la part du conducteur sur le mode en cours du régulateur (activé ou pas).

³ La force de l'appui est calibrée pour permettre l'appui plantaire de l'ensemble des conducteurs sans aller au-delà. La valeur est une donnée confidentielle du constructeur.

IV-1-B-b- Apport de la démarche

L'association de mesures comportementales et physiologiques doit aboutir à qualifier et objectiver la prise en main de cette nouvelle interface, et à quantifier l'éveil (surcharge ou relaxation) que son usage induit. Des essais de découverte de cette nouvelle interface ont été réalisés sur piste, dans des conditions très voisines de la conduite sur route ouverte et en toute sécurité

IV-1-B-c- Protocole expérimental

Seize participants masculins, tous habitués à l'utilisation du régulateur de vitesse, âgés de 38.7 ans en moyenne ($\sigma = 5.3$) ont participé à cette expérience. Le véhicule d'essai était une Laguna équipée d'une boîte de vitesse automatique (BVA) et d'une pédale active permettant l'installation des trois repose-pieds. Les essais ont eu lieu sur la voie rapide d'une des pistes privées de Renault. Après quelques tours de familiarisation (de la piste, du régulateur et des différents repose-pieds), le conducteur a testé chaque repose pied de la manière suivante : il devait suivre une voiture « lièvre » pendant 10km (soit deux tours) roulant à 90 km/h en se contentant de la suivre à cette vitesse grâce à son propre régulateur. Cette phase lui permettait d'évaluer le confort de la position du pied droit. Au troisième tour, la voiture « lièvre » décélérait et accélérât fréquemment obligeant le conducteur à reprendre la main en freinant et en accélérant pour garder la même distance avec le lièvre. L'ordre de test des repose-pieds était déterminé aléatoirement. Pour le repose pied fixe A, chaque sujet avait choisi préalablement, pendant les tours de familiarisation, une position parmi les trois définies par les concepteurs, chacune correspondant à un angle d'ouverture de la cheville. C'est cette position qu'il testait ensuite. Enfin, un quatrième et dernier passage s'effectuait sans repose pied.

Étaient enregistrés en continu, les données cinématiques du véhicule, une vue du pédalier, une vue de la scène routière deux vidéos du conducteur, son activité électrodermale et ses commentaires. Après chaque passage, une échelle de

Lickert à 5 niveaux permettait de donner une note au repose pied (de 1, « très mal » à 5, « très bien »), et un questionnaire récapitulatif était proposé au conducteur.

IV-1-B-d- Résultats

Notes décernées par les 16 sujets aux trois systèmes

Condition ROULAGE

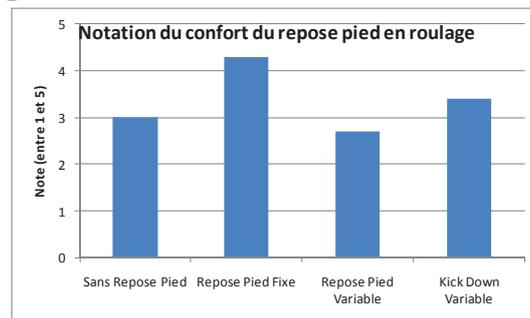


Figure 19 : Evaluation du confort d'utilisation de l'interface associée au régulateur de vitesse.

La note attribuée au repose pied fixe A est supérieure aux 3 autres.

Points positifs : en plus du confort apporté pour le repos de la cheville, le repose pied (quel qu'il soit) permet aux conducteurs de savoir qu'ils sont en mode régulation sans avoir à regarder le tableau de bord.

Le repose pied fixe A procure la sensation de confort la plus immédiate. Le fait que la pédale soit fixe et ne varie pas avec la pente convient à l'ensemble des conducteurs. Elle apporte ainsi une vraie sensation de repos. Treize conducteurs ont choisi la position la plus relevée parmi les trois proposées⁴, malgré un écart de taille entre le plus petit et le plus grand de 20 cm (taille moyenne = 1.77m) ; 2 d'entre eux auraient préféré avoir un angle encore plus fermé.

La position du point dur associé aux 3 repose-pied est globalement appréciée.

Points négatifs : Les repose-pied variables B et C n'apportent rien de plus que le fixe. En revanche, ils peuvent dérouter certains conducteurs et leur faire penser qu'ils ont repris la main alors qu'ils sont toujours en régulation. Ceci a

⁴ Les caractéristiques du dispositif sont confidentielles et ne peuvent être présentées ici.

entraîné régulièrement un détournement du regard vers le tableau de bord pour vérifier le statut du régulateur (la vitesse de consigne clignote ou pas).

Condition FREINAGE

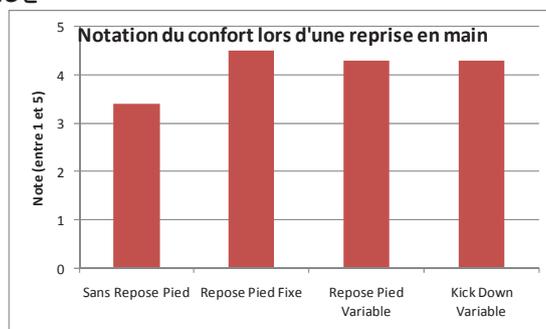


Figure 20 : Evaluation du confort d'utilisation de l'interface associée au régulateur de vitesse lors d'une reprise en main du système par freinage.

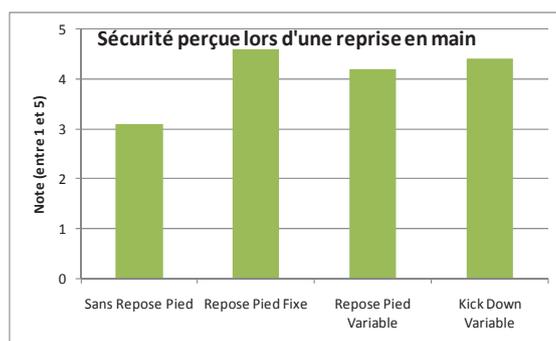


Figure 21 : Evaluation de la sécurité d'utilisation de l'interface associée au régulateur de vitesse lors d'une reprise en main du système par freinage.

Les notes de confort et de sécurité en freinage attribuées aux trois repose pied sont équivalentes mais supérieures à la condition sans repose pied.

Points positifs : Les trois repose-pied procurent une sensation positive de confort et de sécurité de freinage car ils positionnent le pied idéalement pour atteindre le frein. Sans repose pied, lors d'utilisation du régulateur du commerce, la plupart des conducteurs disent garder leur pied droit juste au dessus de l'accélérateur en situation de suivi de véhicule. Cette position est peu confortable à la longue, mais elle permet un freinage sécuritaire. Par contre, ils

reconnaissent que si leur pied avait été posé sur le plancher en avant de l'accélérateur (comme c'est souvent le cas sur autoroute dégagée), le freinage aurait été plus long du fait du mouvement nécessaire à l'atteinte de la pédale de frein).

Condition ACCÉLÉRATION

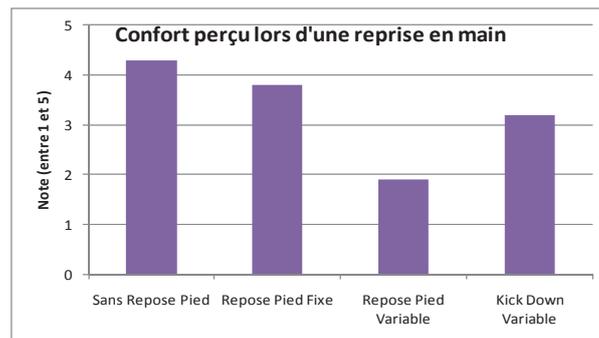


Figure 22 : Evaluation du confort d'utilisation de l'interface associée au régulateur de vitesse lors d'une reprise en main du système par accélération.

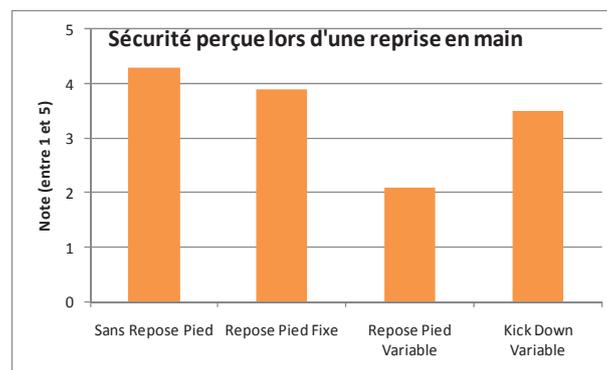


Figure 23 : Evaluation de la sécurité d'utilisation de l'interface associée au régulateur de vitesse lors d'une reprise en main du système par accélération.

Les notes de confort et de sécurité en accélération attribuées au repose pied C sont inférieures aux deux autres repose pied (A et B) et à la référence sans repose pied.

Le système sans repose pied ne se différencie significativement que des systèmes variables (B et C).

Points positifs : L'effort de reprise en main et le temps de réponse de la voiture à la demande d'accélération associés au RPFixe (A) sont unanimement appréciés.

L'impression de confort et de sécurité lors de la reprise en main en accélération avec le repose pied variable B est bonne pour 7 conducteurs.

Points négatifs : L'effort de reprise en main associé au repose pied variable C est beaucoup trop important et est responsable du rejet de ce système par l'ensemble des conducteurs. Une zone dure persiste sans réponse du véhicule ce qui oblige le conducteur à accélérer exagérément pour la dépasser. Une fois cette zone dépassée, le régime moteur ne correspond plus à la vitesse demandée et l'accélération finale est plus importante que voulue au départ. Il y a donc un double effet d'inconfort et d'insécurité.

L'effort de reprise en main en accélération associé au repose pied variable C est mal jugé par 7 conducteurs pour des raisons opposées suivant les gens : soit il est trop faible, soit trop important.

Niveau d'éveil du conducteur

Les variations électrodermales toniques (du niveau de base) sont le reflet du niveau d'éveil du conducteur. Lors de la conduite avec repose pied, le niveau de base augmente significativement ($p < 0.001$ - figure 24). Bien que les conducteurs découvrent cette interface, ils sont plus détendus que lorsqu'ils conduisent avec le régulateur du commerce, sans repose pied.

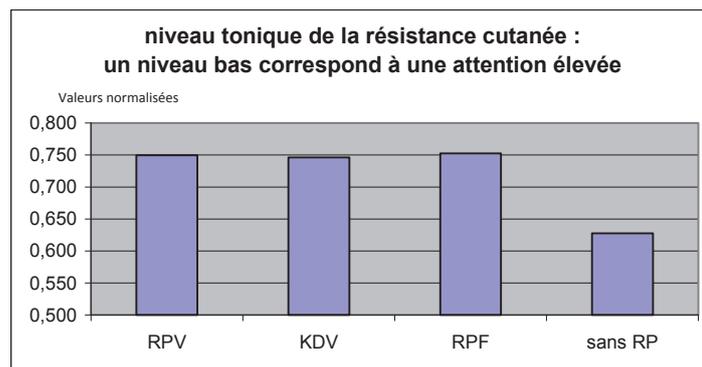


Figure 24 : niveau tonique de la résistance cutanée, en valeurs normalisées. Un niveau faible correspond à un éveil élevé. Les valeurs enregistrées lors de la conduite avec le repose-pied restent compatibles avec les exigences de la conduite automobile, celles-ci étant ordinairement comprises entre 0.6 et 0.8.

Nombre de changements de positions du pied droit

Lorsque les conducteurs disposent d'un repose pied (quel qu'il soit), la position de leur pied droit est plus stable, les changements de position sont significativement réduits ($p < 0.001$).

Le confort ressenti est donc confirmé par leur comportement de conduite (figure 25). Si leur position est confortable, les conducteurs la conservent. Cela contribue également à augmenter la sécurité puisque le pied droit reste sur l'accélérateur, conservant ainsi le référentiel accélérateur - frein en cas de besoin.

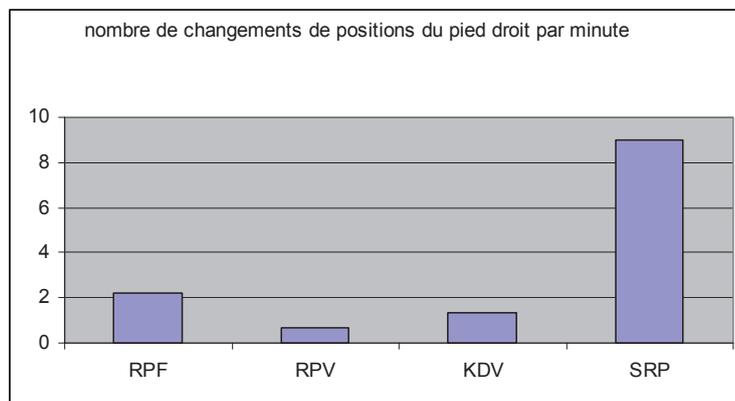


Figure 25 : Fréquence de changements de positions du pied droit (nb/mn).

Temps de mouvement : durée du transfert du pied de l'accélérateur vers le frein.

Les conducteurs ont tous ressenti un apport positif de la présence du repose pied pour la sécurité du freinage. Cette perception est confirmée par la mesure vidéo des temps de transfert du pied de l'accélérateur vers le frein (comptage du nombre d'images avec une fréquence habituelle de 25 images par seconde). La figure 26 indique le gain de temps de transfert du pied droit vers le frein pour chaque type de repose pied, par rapport à une conduite sans repose pied. Les différences sont à la marge du seuil de signification statistique.

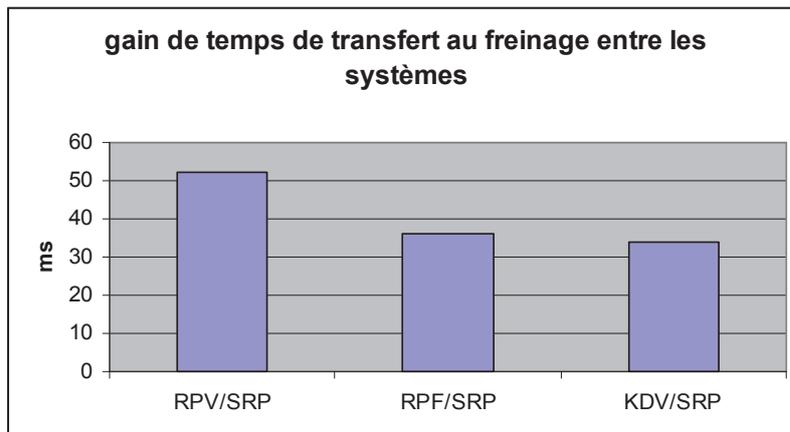


Figure 26 : gain de temps de transfert du pied droit vers le frein

IV-1-B-e- Conclusion

Cette campagne d'essais sur piste a permis de valider l'intérêt d'un repose pied associé au régulateur de vitesse. Les conducteurs ont plébiscité cette interface aussi bien par leurs verbatims que par leur comportement de conduite et par leurs réponses physiologiques. Ces trois moyens d'évaluation complémentaires ont également permis de déterminer laquelle des trois interfaces était la plus appropriée : le repose pied fixe C -pour lequel il reste à trouver l'angle adéquat de la pédale- puisque son confort est avéré, quelle que soit la taille du conducteur et la vitesse de consigne.

Une nouvelle campagne d'essais a été menée sur autoroute, avec 50 conducteurs de petite, moyenne et grande taille, hommes et femmes, actifs et retraités, à 110 et 130 km/h, avec 7 configurations possibles. Les deux positions les plus relevées ont été les plus appréciées, indépendamment des critères retenus. Le repose pied a été pris en main facilement et rapidement comme en témoignent les réponses physiologiques, les notes attribuées (sécurité et confort d'usage) et les verbatims.

Les participants étaient néanmoins accompagnés par un expérimentateur pendant leur découverte du système ce qui les a sans doute mis en confiance et facilité la prise en main. En effet, bien que de nombreux points positifs soient relatés

(sécurité accrue, confort, remise dans la boucle, etc....), poser son pied sur l'accélérateur sans que cela soit suivi d'une élévation de vitesse est contraire à ce que tout conducteur a expérimenté auparavant. Cette référence n'est pas encore mémorisée, ce qui risque d'induire des incompréhensions d'usage. Après habitude, les sujets reconnaissent généralement que le repose-pied est la position la plus logique par rapport à la position pied au plancher. L'habitude sera donc nécessaire et permettra d'associer cette position avec la conduite sous régulateur. Ainsi, il serait préférable d'accompagner le conducteur dans sa découverte du système bien que cela ne soit pas très compatible actuellement, avec le temps que le réseau commercial peut accorder à chaque client lors de la mise en main.

Ces résultats restent à confirmer lors d'expérimentations sans formation ni mise en main, pour reproduire le cas réel de découverte d'une nouvelle interface par les conducteurs.

IV-1-c - Utilisation en situation critique de conduite

IV-1-C-a - Contexte et objectifs

On a vu au chapitre II-2, la nécessité -pour les personnes ne bénéficiant pas d'un apprentissage - de comprendre le fonctionnement d'un système d'assistance, avant de s'en servir. On a évoqué les représentations erronées du champ d'action d'un système, et le problème de complaisance qui entraîne l'utilisation du dit système dans de configurations de roulage inappropriées. Dans ces deux cas de figure, bien que le système soit opérationnel, il est donc possible que certains conducteurs l'utilisent à mauvais escient, et se retrouvent en situation critique, soit par une fausse représentation des fonctionnalités du système, soit par flemme de le déconnecter. Une troisième situation peut induire une utilisation inadaptée d'un système d'assistance : une forte contrainte temporelle . Nous avons voulu recréer ce type de situation sur piste, tout en assurant les

meilleures conditions de sécurité possible, afin d'étudier le comportement de conducteurs confrontés à une situation inattendue en conduite régulée.

IV-1-C-b - Apport de la démarche proposée.

Les variables dépendantes précédemment enregistrées devraient permettre de tester les hypothèses suivantes :

- ✓ Après une première tentative infructueuse de désactivation, les conducteurs réitèrent la même action car la contrainte temporelle ne leur permet pas d'envisager une autre solution pour désactiver le régulateur
- ✓ L'utilisation du régulateur de vitesse sous forte contrainte temporelle dépend du niveau d'expertise des conducteurs.
- ✓ Les réponses physiologiques associées à un usage normal du régulateur devraient être différentes de celles obtenues en usage inhabituel. Cet état physiologique est ressenti par le conducteur lorsqu'il est soumis à une forte charge qu'il peut décrire a posteriori, mais en fonction de son expertise.
- ✓ Par conséquent, les réactions physiologiques des conducteurs devraient être différentes selon le niveau d'expérience qu'ils ont du régulateur.

IV-1-C-c. Protocole expérimental

24 personnes volontaires ont participé à cette campagne d'essais sur piste privée, correspondant au tracé d'une voie rapide. Un questionnaire préliminaire sur les habitudes de conduite et l'utilisation du régulateur de vitesse a permis d'affiner la répartition des participants en trois groupes :

Le groupe A (moyenne d'âge 37,2 ans \pm 6,7), était composé de 6 participants (2 femmes et 4 hommes) avec peu ou pas d'expérience de conduite avec régulateur de vitesse

Le groupe B (moyenne d'âge, 40 ans \pm 8,1) était constitué de 8 participants, dont une femme. Ils avaient tous déjà utilisé un régulateur de vitesse mais de façon irrégulière. Leur pratique variait de quelques fois à une trentaine de fois par mois. Ce groupe était considéré comme moyennement expérimenté.

Le groupe C (moyenne d'âge 45,9 ans \pm 8,1) comportait 10 participants, dont une femme. Ils conduisaient fréquemment avec régulateur de vitesse (plusieurs fois par semaine) et constituaient donc le groupe expérimenté.

Lors du recrutement, les participants ont également passé le test de Stroop. Basé sur un conflit mots-couleurs, il est l'un des plus utilisés pour mesurer la résistance au stress. Il est composé de trois parties de 90 secondes chacune. Les 2 premières constituent les références et permettent de prédire un résultat à la 3^e lors de laquelle les participants sont confrontés au conflit. La capacité à résoudre le conflit, donc à atteindre le résultat prédit détermine un niveau entre 0 et 10. De 0 à 4 inclus, le participant est peu résistant au stress (de moins en moins en allant vers 0). De 6 à 10 inclus, le participant est résistant au stress (de plus en plus en allant vers 10). La classe 5 est intermédiaire.

Les groupes A, B et C ont obtenu une moyenne de 5,5 (\pm 3,1), 5,6 (\pm 2,9) et 5,7 (\pm 1,6), respectivement, et sont donc homogènes. Pour tester le facteur résistance au stress, nous avons réparti les sujets dans un groupe « Faible résistance » (FA, score compris entre 1 et 3) un groupe « moyennement résistant » (MY, score compris entre 4 et 6) et un groupe « fortement résistant » (FO, score compris entre 7 et 9).

L'expérimentation a eu lieu sur piste, à bord d'une Modus équipée d'un double pédalier pour renforcer la sécurité des participants. Un copilote expérimenté, capable de reprendre le véhicule en main à tout moment ainsi qu'un expérimentateur, accompagnaient le conducteur. À l'arrêt, avant l'essai, l'expérimentateur expliquait ou rappelait le fonctionnement du régulateur de vitesse. La piste, d'une longueur d'environ 5 km, était constituée d'une longue ligne droite et d'autres plus courtes ainsi que de plusieurs virages. L'un d'entre

eux, suivant la plus grande ligne droite nécessitait obligatoirement une diminution de la vitesse pour le franchir sans encombre. C'est ce passage qui a été utilisé pour l'étude particulière de la désactivation du régulateur de vitesse.

Situation nominale : le premier tour était une reconnaissance du parcours. Lors du second, les participants pouvaient tester les différentes commandes du régulateur. C'était une phase de familiarisation, surtout pour les moins expérimentés. Durant les tours suivants, (25 minutes de conduite), ils avaient pour consigne de rester en régulation à 110 puis à 120 km/h. Pour être sûr que tous étaient dans les mêmes conditions, il leur a été demandé de ne pas faire varier la vitesse de consigne via les boutons +/- . S'ils souhaitaient rouler plus ou moins vite, ils devaient désactiver le régulateur. Cette contrainte avait pour but de mettre tous les conducteurs dans la même situation, lorsqu'ils étaient en mode régulé. À chaque entrée dans le virage étudié, tous les conducteurs devaient désactiver le régulateur pour le négocier à une vitesse nettement inférieure à la consigne, environ 90 km/h.

Comme pour toutes les expérimentations où l'on souhaite générer un effet de surprise, l'objectif était d'abord de mettre les conducteurs en confiance en les plaçant dans une situation habituelle tout en favorisant la conversation avec le copilote et l'expérimentateur.

Situation inattendue : lors du 7^e et dernier tour, les conducteurs devaient désactiver le régulateur à l'approche du virage pour ralentir. L'objectif était alors d'induire un dysfonctionnement fictif du régulateur autrement dit, de leur faire croire que le mode de désactivation choisi était défaillant. à partir de cet instant, le but était d'étudier leur comportement et les stratégies compensatoires. En réalité, le système restait parfaitement opérationnel et efficace, mais sa désactivation était impossible pendant les deux premières actions du conducteur. On voulait savoir si ce dernier, après un premier diagnostic, tenterait à nouveau de désactiver le système en restant sur sa

première décision ou s'il chercherait une autre alternative pour compenser cette défaillance supposée. Ce n'est qu'à sa troisième commande que le conducteur pouvait effectivement désactiver le régulateur. Durant les deux premières actions, s'il choisissait de le désactiver avec le frein, il pouvait ralentir le véhicule tant qu'il appuyait sur la pédale, mais une fois celle-ci relâchée, le véhicule ré accélérait jusqu'à atteindre de nouveau la vitesse de consigne. S'il choisissait de désactiver le système en appuyant sur le [O] du volant, la demande n'était pas prise en compte et la vitesse du véhicule ne variait pas.

Il aurait été souhaitable que, quel que soit le mode de désactivation choisi, le conducteur soit dans la même situation et perçoive tout de suite que l'action était inopérante mais pour des raisons de sécurité inhérentes au système de freinage, il n'a pas été possible d'empêcher le freinage quand le conducteur avait choisi de désactiver par le frein. Pour ce cas de figure, la sensation de dysfonctionnement arrivait plus tard, dès que la pédale de frein était relâchée.

IV-1-C-d- Résultats

Stratégies de désactivation

Les 24 participants ont tous réalisé au minimum trois actions pour désactiver le régulateur, après avoir constaté que les deux premières étaient sans effet. Compte tenu du faible nombre d'observations, nous ne procéderons qu'à des statistiques descriptives.

Lors de la première tentative, 13 conducteurs ont d'abord tenté un appui sur la mise à zéro (touche [O], située au volant et les 11 autres ont appuyé sur le frein. Pour la seconde, le frein a été majoritairement utilisé (16 participants sur 24), les 8 autres ayant appuyé sur touche [O] du volant. Enfin, pour la troisième, c'est encore plus majoritairement que le frein a été utilisé (17 sur 24) ; les 7 autres ont préféré appuyer sur la touche [O] du volant.

Au fil des tentatives, on observe donc une augmentation du choix de désactivation en faveur du frein, ce qui correspond également à une contrainte temporelle de plus en plus forte : le virage approche et, non seulement il faut désactiver le régulateur, mais, en plus, il faut décélérer pour le franchir en toute sécurité.

Les opérations de désactivations successives de la première à la troisième action, révèlent six stratégies suivant les conducteurs (Tableau 5) : 14 participants, ont réessayé trois fois de suite la même action et 10 d'entre eux toujours en freinant.

Opérations successives	Nombre de participants
Frein - Frein - Frein	10
Touche [0] - Touche [0] - Touche [0]	4
Touche [0] - Touche [0] - Frein	4
Touche [0] - Frein - Frein	3
Touche [0] - Frein - Touche [0]	2
Frein - Frein - Touche [0]	1

Tableau 5 : Modes stratégiques de déconnexion du régulateur de vitesse

58% des participants ont persisté à réaliser la même action, malgré l'absence de réaction du système. Parmi les 13 qui ont appuyé sur touche [0] à la première désactivation, 8 ont tenté un autre appui immédiatement après. Lors des entretiens, 6 d'entre eux disent avoir pensé avoir fait une erreur de manipulation ou un appui trop léger sur touche.

Si l'on s'intéresse maintenant aux stratégies de désactivation du régulateur (figure 27), on constate que, pour la première action, les moins expérimentés (Groupe A) favorisent davantage la Touche [0] (67 %) que le frein (33%) Les

groupes B et C (intermédiaires et experts) utilisent autant la Touche [0] que le frein.

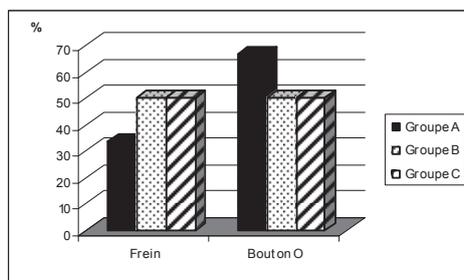


Figure 27 : Répartition de la première désactivation selon les groupes d'expérience

Pour la deuxième tentative de désactivation, le facteur expérience prend davantage de poids (figure 28). Les débutants refont exactement les mêmes actions. Chez les moyennement expérimentés (Groupe B), 75 % ont freiné et les 25% autres se sont servis de la commande au volant. 80% des plus expérimentés (Groupe C) ont freiné et les 20% restants ont désactivé le régulateur avec la commande du volant.

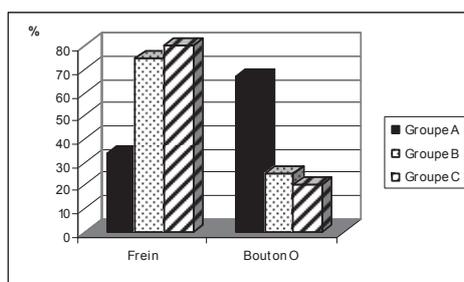


Figure 28 : Répartition de la deuxième désactivation selon les groupes d'expérience

Lors de la troisième désactivation (Figure 29), le groupe A a finalement inversé sa stratégie : 67 % ont utilisé le de frein contre 33 % l'appui sur le bouton. Les groupes B et C n'ont plus changé leur stratégie, ils sont majoritaires à freiner (87% pour le groupe B et 60 % pour le groupe C). Dans le groupe B, un seul participant sur huit a eu recours à la Touche [0] contre 40 % pour le groupe C.

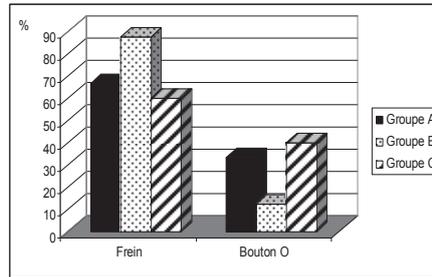


Figure 29 : Répartition de la troisième désactivation selon les groupes d'expérience

Après cette troisième tentative de désactivation, la suivante est suivie d'effets conformément au protocole (système de régulation à nouveau rendu fonctionnel). Malgré cela, 13 participants ont encore tenté une, deux, voire trois autres actions supplémentaires pensant que le régulateur n'était toujours pas désactivé. Parmi eux, 6 ont appuyé sur le frein, 6 sur Touche [O] et 1 a même été chercher directement l'interrupteur principal situé sous la planche de bord à gauche du volant. Enfin 3 participants ont tenté une cinquième action par appui sur le frein.

Réponses physiologiques :

Pour chaque tour, l'instant de désactivation du régulateur était repéré à la fois sur le Bus CAN, la vidéo et les enregistrements physiologiques. Cette redondance d'informations améliore la fiabilité de la méthode d'identification des réponses induites par la situation. Cet instant sert de temps de référence à partir duquel la réponse électrodermale (RED) associée à chaque désactivation est détectée. Ainsi on a pu mesurer, pour chaque participant, 7 RED dont la dernière correspond à la tentative de désactivation accompagnée du dysfonctionnement fictif du système.

La résistance cutanée des 24 participants a pu être exploitée. La durée de la perturbation ohmique (DPO) et la latence des RED associées à chaque désactivation du régulateur ont été mesurées. Afin d'observer l'effet de la contrainte imposée par l'impossibilité de désactiver le système, nous avons comparé les médianes des DPO et des latences mesurées sur les 6 premiers tours (fonctionnement normal du système) aux valeurs mesurées lors du dernier

tour (dysfonctionnement fictif du système). L'analyse intra-sujets a montré une différence significative de la DPO entre les 6 premiers tours et le dernier : $F(1,22) = 30.8, p < 0.0001$. La durée de la réponse associée à une désactivation passe effectivement de 4.4s en condition normale à 14s lors du dysfonctionnement fictif du dernier tour (figure 30). Rappelons que la DPO est la durée pendant laquelle le système nerveux répond à un stimulus. Cela démontre l'intensité de l'activation orthosympathique provoquée par l'augmentation de la charge de la situation critique du dernier tour.

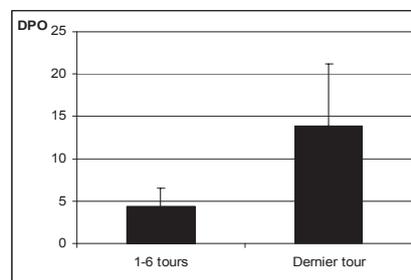


Figure 30 : Variations de l'activité électrodermale associée aux actions de désactivation : effet d'un dysfonctionnement fictif du système.

Verbalisations post-expérience

Tous les participants se souviennent qu'un dysfonctionnement du régulateur s'est produit durant leur essai. Deux participants seulement ne se souviennent pas à quel moment exact du parcours il s'est produit. La moitié a pu retracer avec exactitude les diverses actions réalisées pour le désactiver. Concernant les émotions ressenties, 10 participants ont exprimé un état de surprise, 10 autres ont dit ne pas avoir été en situation de panique, et 4 ont mentionné qu'ils étaient un peu ou légèrement stressés. Un seul a évoqué une poussée d'adrénaline. Concernant les tentatives de désactivation, 3 participants ont mentionné ne pas avoir pensé à la touche [O] située sur volant.

IV-1-C-e-Discussion

La majorité des conducteurs soumis à une pseudo défaillance du système sous contrainte temporelle forte, a persévéré dans la même action, que ce soit par appui sur le frein ou sur la touche [O], jusqu'à finalement obtenir une réponse du système.

Cette forme d'entêtement, dans le choix d'une action pourtant inefficace, montre bien l'effet bloquant (que l'on pourrait aussi appeler sidérant dans le sens littéral du terme) de la charge sur les capacités cognitives et l'adoption de stratégies adaptées. Effectivement, la charge résultante est avérée : contrainte temporelle forte, incertitude de la situation, intégrité corporelle mise en jeu... Cela est conforté par les réponses physiologiques associées à la découverte de la défaillance du système : une DPO de près de 14s est parmi les plus longues que nous avons pu enregistrer dans d'autres expérimentations impliquant une situation critique de conduite. Pourtant, la plupart des participants, quand ils sont interrogés sur leur perception post-expérience, ne relatent pas verbalement l'équivalent de ce que montrent leurs réponses physiologiques. Ce phénomène est très intéressant et montre une fois de plus l'intérêt de l'utilisation des enregistrements physiologiques pour connaître la réalité d'une situation, telle qu'elle a été vécue sur le moment par les participants. La minimisation de la charge perçue peut, dans le cas présent, s'expliquer, en partie, par le fait que tous les participants ont fini par trouver une solution à la situation, puisque le copilote n'a jamais eu à reprendre le contrôle du véhicule. De plus, compte tenu du caractère expérimental de la situation, les conducteurs savaient qu'ils étaient en sécurité. Malgré cela, seule la moitié des participants a su retracer avec exactitude le déroulement de leurs actions, aboutissant à la reprise en main du véhicule. Après une expérience de conduite sous pression temporelle forte, les récits des personnes impliquées ont tendance à se différencier de la réalité. Cet état de fait est valable aussi bien au cours d'expérimentations de ce type que lors de situations accidentogènes en conduite réelle. De nombreux conducteurs, en toute bonne foi, sont capables de

réinventer une histoire pour expliquer pourquoi ils se sont retrouvés dans une situation d'accident, alors qu'ils ont oublié l'essentiel du déroulé de la situation critique, uniquement à cause de la charge perçue.

Les composantes attentionnelle et émotionnelle de la charge associées à cette situation de conduite et quantifiées par les mesures physiologiques sont faiblement corrélées aux caractéristiques individuelles des conducteurs que nous avons prises en compte : expertise dans l'usage du régulateur et résistance au stress de situation via le test de Stroop. Ceci n'est pas surprenant car ces réponses physiologiques sont issues du système nerveux autonome et, par conséquent, indépendantes de la conscience de l'individu. Elles témoignent de la réponse du système activateur de l'organisme, soumis à une situation perçue comme critique. La capacité de réussite au test de Stroop reflète, quant à elle, le versant cognitif de la résistance au stress de l'individu. De même, l'habitude de se servir du régulateur est le fruit d'un apprentissage, maîtrise progressive des opérations de manipulation des commandes, puis de leur automatisation progressive.

Concernant la manière d'utiliser le régulateur de vitesse selon le niveau d'expertise des conducteurs, les plus expérimentés ont tout de suite favorisé la désactivation par la pédale de frein plutôt que par la touche [O]. Cette stratégie était la meilleure compte tenu de la contrainte temporelle de la situation. Dans ce cas, les personnes habituées au régulateur ont gagné du temps, le frein désactivant le système et ralentissant le véhicule, la touche [O] ne faisant que le désactiver. Les moins expérimentés ont sans doute anticipé l'action de désactivation parce qu'ils ne maîtrisaient pas parfaitement le système et qu'ils souhaitaient se donner ainsi une marge opérationnelle. De cette façon, à cet endroit de la piste (ligne droite), une simple désactivation pouvait suffire sans nécessité de freinage. Par contre, plusieurs ont persévéré dans ce choix malgré l'approche du virage, et donc du danger et du réel besoin de freiner. Les plus expérimentés, quant à eux, se permettaient de désactiver leur régulateur plus

tard, juste à l'entrée du virage. A cet endroit, il était nécessaire de ralentir le véhicule et désactiver le régulateur n'était plus suffisant.

IV-1-C-f- Conclusion

Allier deux méthodes telles que l'analyse de l'activité et des manifestations physiologiques permet de confronter l'activité réelle des conducteurs, ainsi que les réponses corporelles à une situation critique à leurs verbalisations et leurs ressentis. Dans cette étude, les conducteurs ont tous réussi à maîtriser au final la situation, malgré des stratégies souvent peu adaptées ni adaptatives, puisque la plupart ont tenté une deuxième- voire une troisième- action similaire à la première, bien que celle-ci n'ait pas été couronnée de succès.

Après l'essai, ils ont explicité un ressenti émotionnel de la situation en décalage avec leur état physiologique, avec une tendance à minimiser leurs émotions. Compte tenu de ces deux résultats, on peut se poser la question de la recevabilité des témoignages des personnes impliquées dans des accidents réels.

IV-2- Exemple du système de freinage

IV-2-A- Utilisation en conduite nominale

IV-2-A- a- Contexte et objectif de l'étude

Le choix de réaliser des essais en conduite simulée est souvent privilégié dans les études comportementales pour trois raisons majeures : la sécurité, la reproductibilité des essais et la facilité de recueil des données du véhicule et de l'environnement. Cependant, certaines études ont déjà montré que le comportement de conduite peut être modifié par l'environnement simulé mais peu nombreuses sont celles qui s'intéressent à la comparaison des stratégies de freinage en environnement réel et simulé ; quand elles existent c'est plutôt pour étudier des situations de freinage d'urgence.

Cette étude a pour but de comparer le comportement et la performance de conduite associée à une tâche de freinage simple centrée sur une cible, en fonction du support de conduite : piste ou simulateur dynamique. L'objectif final est de pouvoir préciser aux utilisateurs du simulateur dynamique Renault si ce dernier est utilisable pour tester des systèmes ou interfaces impliquant une décélération appuyée, sans apporter un biais dû à l'interface conducteur-simulateur. Autrement dit, le fait de conduire sur un simulateur pour la première fois peut modifier la manière habituelle de piloter. Egalement, compte tenu de la capacité des simulateurs à retranscrire plus ou moins fidèlement les accélérations linéaires et angulaires, le conducteur peut les percevoir différemment de la conduite réelle.

Dans cet essai, le simulateur est le système à étudier et on souhaite savoir si sa prise en main est suffisamment rapide et efficace pour permettre aux conducteurs de réaliser des tâches habituelles de type freinage normal, jusqu'à l'arrêt. Pour répondre à cette question, on a numérisé et reproduit sur le simulateur une des pistes privées de Renault. Les conducteurs ont effectué leurs

essais à la fois sur la piste et sur le simulateur avec pour consigne la reproduction des freinages à l'identique.

On s'intéresse notamment aux stratégies de freinage incluant la performance d'arrêt à la cible (distance en centimètres, le temps de préparation à l'action, la durée du freinage et la décélération moyenne. Une variable physiologique devrait également permettre d'évaluer la charge mentale induite par cette stratégie.

IV-2-A- b - Protocole expérimental

Participants

Initialement, la campagne d'essais prévoyait d'impliquer 20 conducteurs mais 6 d'entre eux ont été malades en conduisant sur le simulateur. Pour 7 autres la totalité des données prévues n'a pas pu être recueillie (issues du véhicule, du conducteur et de l'environnement de manière concomitante pour les 8 freinages consécutifs). Au final, seuls 7 conducteurs ont fourni l'ensemble des données.

Ils étaient âgés entre 29 et 55 ans (moyenne = 39 et ET = 10.1). Leur expérience de conduite variait de 12 à 36 ans (moyenne = 19.5 et ET = 9.1). Tous étaient volontaires pour participer à cette expérimentation et conduite un simulateur de conduite dynamique. Chacun a été confronté aux 2 sessions de conduite à une semaine d'intervalle, le même jour à la même heure pour éviter tout biais extérieur. L'ordre de passage a été contrebalancé (3 d'entre eux ont commencé par la conduite sur piste et les 3 autres par la conduite simulée). Le parcours était le même quelle que soit la session et durait environ 40 minutes.

Parcours sur voie rapide

Elle mesure 5 km de long. Les participants devaient conduire en respectant une vitesse comprise entre 80 et 120 km/h suivant les endroits du parcours.

Parcours sur le simulateur dynamique CARDS 2

Ce simulateur consiste en une plateforme mobile, avec six degrés de liberté. Trois écrans permettent un champ de vision de 150° et la rétro vision est

restituée afin d'immerger au mieux le conducteur dans l'environnement routier. Pendant les deux sessions de conduite (réelle et simulée), le même expérimentateur était assis à côté du conducteur, lui donnait les instructions nécessaires et veillait au respect des consignes.

Le freinage

Les deux sessions étaient constituées de 8 tours de parcours, incluant une tâche de freinage à la fin de chaque tour. Les participants devaient freiner pour s'arrêter le plus près possible d'une ligne virtuelle située entre deux cônes placés de part et d'autre de la voie, en ligne droite, 300 mètres après la fin de la dernière grande courbe (figure 31). Cette situation de freinage était en effet censée représenter un arrêt à un stop.

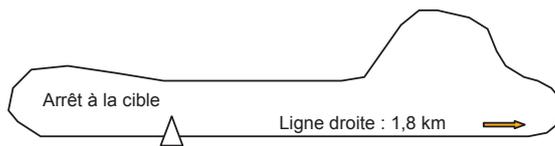


Figure 31 : localisation de la tâche de freinage sur la piste.

La vitesse de roulage avant le début du freinage était d'environ 90 km/h et nous avons vérifié au préalable l'absence de différence significative entre les participants, quel que soit le support.

Les variables étudiées

Trois catégories de variables ont été étudiées : comportementales (en relation avec le freinage), physiologiques (en relation avec la charge mentale associée), et subjectives par une auto estimation de la difficulté perçue de la tâche de freinage en utilisant une échelle de Lickert à 5 niveaux.

Données comportementales liées aux caractéristiques du freinage :

- Début de la décélération.
- Durée de la décélération.
- Distance à la cible.

- Décélération moyenne.

Donnée physiologique :

L'activité électrodermale est l'un des indicateurs les plus pertinents en réponse à des stimuli variés ; Elle est quantifiée ici par la durée de sa réponse, reflet précis de la durée du processus perception-traitement-décision. Comme l'activité électrodermale est très sensible à l'habituation, ses réponses peuvent décroître voire disparaître si les ressources attentionnelles nécessaires à la réalisation d'une tâche sont de moins en moins importantes. L'activité électrodermale a été mesurée au moyen de 2 électrodes Ag/AgCl placées sur la troisième phalange de l'index et du majeur de la main gauche. Les données ont été enregistrées via une plateforme de mesures et analysées après l'essai. L'analyse de la réponse électrodermale a permis la quantification de la charge mentale associée à chaque freinage (durée de la réponse) et la corrélation entre décision d'action (début de la réponse) et début de l'action (début du temps de mouvement).

Données subjectives : elles consistent en une auto estimation de la difficulté perçue à l'issue de la série des 8 freinages avec une échelle de Lickert à 5 niveaux (1 = très facile à réaliser ; 5 = très difficile à réaliser).

IV-2-A- c- Résultats

Analyse comportementale

La durée et la décélération moyennes lors du freinage sont différentes suivant le support de conduite (Figure 32). L'analyse de variance montre que $F(1, 5) = 15.3, P < .006$, la durée de freinage étant de 16.4s sur simulateur et 13s sur piste. La durée de freinage est plus longue sur simulateur que sur piste. Pour la décélération moyenne, on a $F(1, 5) = 12.5, P < .01$; elle s'élève à 1.6 m/s^2 sur simulateur et à 2.2 m/s^2 sur piste. Logiquement, la décélération est moins intense sur simulateur que sur piste.

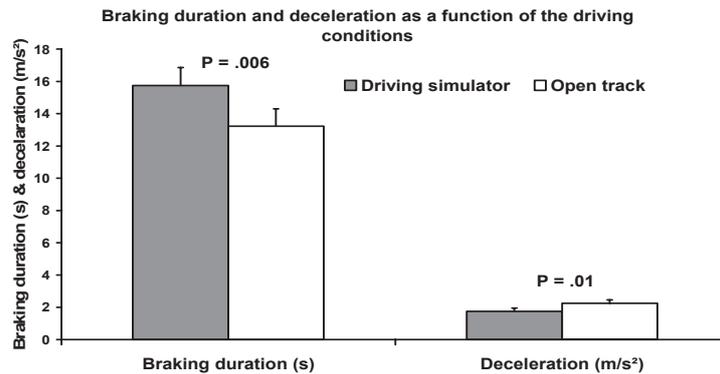


Figure 32 : Durée moyenne de freinage et décélération selon le support de conduite. Sur piste, les participants freinent moins longtemps mais avec une décélération plus forte que sur simulateur

La Figure 33 montre que la distance moyenne entre la voiture et la cible est différente selon le support, la meilleure performance ayant lieu sur piste. La condition simulée a rendu les participants moins précis avec une distance à la cible quadruplée.

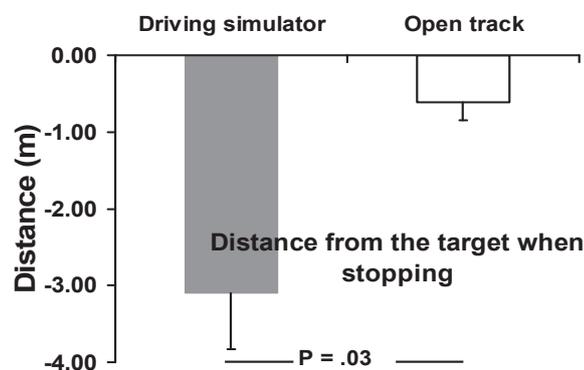


Figure 33 : Distance moyenne à la cible sur les deux supports. Les participants s'arrêtent plus loin de la cible sur simulateur

Tous ont néanmoins pu arrêter la voiture avant la cible, $F(1, 5) = 7.3, P < .03$, les valeurs moyennes étant -3.1m sur simulateur et -0.6m sur piste. Cette performance n'a pas évolué au cours des freinages, quel que soit le support : $F(7, 49) = 1.06, P = .40, \text{NS}$, pour le simulateur ; $F(7, 49) = 0.97, P = .46, \text{NS}$, pour la piste.

Analyse physiologique

La durée moyenne de la réponse électrodermale (DPO) est significativement différente selon le support de conduite (Figure 34). Les faibles durées relevées sur piste sont comparables à celles obtenues précédemment dans le cadre d'autres études de freinage chez Renault (2.8s) et montrent qu'un freinage de routine ne s'accompagne pas d'une charge mentale élevée. En revanche, les réponses sont significativement plus longues sur simulateur, 8.3s, reflétant ainsi une charge mentale plus élevée : $F(1, 7) = 9.68, P = .017$. De la même manière, le délai entre le début de la réponse électrodermale et l'arrêt à la cible est plus long sur simulateur : $F(1, 7) = 7.15, P = .03$. Le délai moyen est de -13.7 secondes sur simulateur et de -7.8 secondes sur piste.

Sur simulateur, les conducteurs ont donc initié plus tôt l'arrêt de la voiture ; la décision d'action était donc plus précoce. Par contre, il n'y pas de différence significative entre le délai d'apparition de la DPO et le début du freinage, en fonction du support. Cet indice est un indicateur du délai : décision-action, $F(1, 7) = 1.77, P = .22, NS$. La conduite sur simulateur n'a donc pas induit un changement de l'automatisme de freinage par rapport à la piste.

Sur piste, la charge mentale associée à chaque freinage reste constante au cours du temps, contrairement au simulateur, où l'on observe une évolution en augmentation de la DPO au fil des freinages (Figure 35)

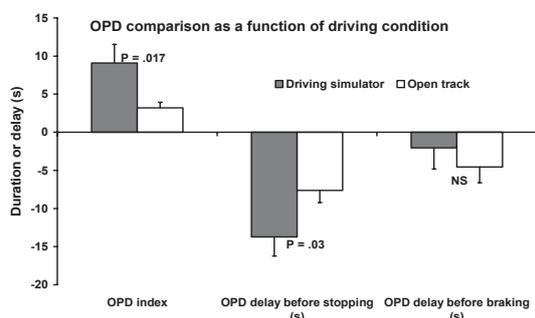


Figure 34 : Activité électrodermale (DPO). Cet indicateur différencie les deux supports de conduite en montrant une réponse plus longue sur simulateur, et un délai plus important entre la réponse et l'arrêt à la cible. Pas de différence du délai décision-action en fonction du support.

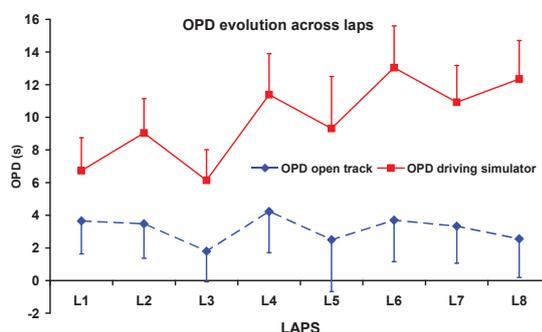


Figure 35 : Evolution de la DPO au fil des tours. Les valeurs restent basses et stables sur piste alors qu'elles augmentent sur simulateur.

Analyse subjective

À la fin de chaque essai, les participants devaient noter la difficulté perçue de la tâche de freinage (note moyenne sur les 8 tours) sur une échelle de Lickert à 5 niveaux. Le premier correspondait à « très facile à réaliser » et le cinquième à « très difficile à réaliser ». La valeur moyenne obtenue sur piste est de 1.17 (0.4) ; celle sur simulateur est de 2.33 (1.03). Un test t apparié a montré une différence significative entre ces deux valeurs : $t = 3.80$, $P = .01$. La difficulté perçue par les conducteurs confirme les résultats comportementaux et physiologiques.

IV-2-A-d- Conclusion

Malgré le faible nombre de participants ayant réalisé les essais dans leur intégralité avec des valeurs exploitables, plusieurs résultats peuvent être rappelés et soulignés.

Sur simulateur, la décélération moyenne est plus faible, la durée du freinage plus longue et la performance d'arrêt à la cible est dégradée. Le regroupement de ces trois résultats peut être associé au comportement du conducteur novice. Inversement, sur piste, une décélération plus forte et une durée de freinage plus courte sont associées à un arrêt plus précis et témoignent de l'expérience des conducteurs. Sur simulateur, les participants ont donc eu du mal à contrôler leurs freinages, comme s'ils étaient des nouveaux conducteurs.

Les données issues de l'indicateur électrodermal montrent que les participants ont dû débiter leur freinage plus tôt sur simulateur et, malgré cela, la performance finale n'était pas concluante. L'augmentation des valeurs de la DPO à chaque freinage au cours des 8 tours montre que la charge mentale augmente sur simulateur et témoigne de l'incapacité à réaliser cette tâche de façon automatique comme cela leur est possible en conduite réelle.

Ces résultats montrent que, pour le conducteur lambda, une simple tâche de freinage n'est pas reproductible sur simulateur dynamique à l'identique que sur piste et s'accompagne d'une plus forte demande attentionnelle.

L'activité électrodermale associée à la performance de conduite ont permis de conclure qu'il est déconseillé de réaliser des tests relatifs à des systèmes de freinage sur le simulateur dynamique sans apprentissage préalable. Une simple prise en main se révèle insuffisante, comme en témoignent l'augmentation de la DPO au cours des essais. Les conclusions qui pourraient en être tirées risqueraient d'être biaisées par les difficultés des conducteurs à reproduire le comportement de freinage habituel sur ce type de support. Dans ce cas de figure, le recours aux essais sur pistes est recommandé ou alors, si la sécurité des sujets l'exige, un apprentissage approfondi des situations sur le simulateur. Cette préconisation a été faite à toutes les personnes de l'entreprise souhaitant étudier el comportement de conduite impliquant des actions de freinage.

IV-2-B- Utilisation en situation critique

IV-2-B-a - Rappel du contexte

Le freinage est essentiel pour limiter le risque d'accident ou réduire sa violence en cas de choc. C'est sans surprise que la plupart des systèmes d'évitement d'accident agissent sur le freinage comme l'anti blocage des roues (ABS), l'aide au freinage d'urgence (AFU), et le contrôle dynamique de trajectoire (ESP). En parallèle aux progrès accomplis par les ingénieurs, et donc à l'amélioration des performances techniques des automobiles, il est important de s'intéresser aux actions des conducteurs impliqués dans les accidents réels. Alleaume et al. (1998), sur la base de 277 études détaillées d'accidents (EDA), ont montré que seuls 45% des conducteurs impliqués dans des dommages corporels ont freiné. Pour les 55 autres, peu importe que leur véhicule soit équipé des meilleures aide au freinage puisqu'ils n'y ont même pas eu recours.

IV-2-B-b- Le système d'aide utilisé

L'ABS permet de conserver le potentiel maximal de décélération et le contrôle de la direction du véhicule. Il détecte les amorces de blocage des roues, grâce à des capteurs intégrés qui surveillent leur rotation en permanence. Dès qu'un blocage s'amorce, un calculateur central déclenche un système de compensation hydraulique qui réduit la pression dans le circuit de freinage, libère la roue afin que le pneu retrouve son adhérence. Puis, il la rétablit aussitôt pour que le freinage se poursuive.

Contrairement à une idée reçue, l'ABS seul ne réduit pas les distances de freinage, mais optimise ce dernier, quelle que soit l'adhérence entre le pneumatique et le sol. Il permet surtout au conducteur de conserver la maîtrise de la trajectoire de sa voiture et sa stabilité, en gardant son contrôle : un véhicule ayant les roues bloquées poursuit une trajectoire rectiligne même si on braque le volant.

L'ABS régule la pression 15 fois/sec. Les feux de détresse s'allument quelques secondes au moment du déclenchement de l'ABS, pour alerter le conducteur qui suit de l'urgence du freinage devant lui. La stratégie d'utilisation de l'ABS la plus efficace est d'appuyer à fond sur la pédale de frein puis de débrayer pour éviter de caler et pouvoir dégager la voie immédiatement, si besoin.

L'AFU est un complément à l'ABS qui détecte un freinage d'urgence et joue alors sur le circuit hydraulique pour accroître son efficacité : il applique automatiquement aux freins la pression maximale dès le début du freinage. Sa fonction est de compenser la «timidité de freinage» en sollicitant les ressources maximales du circuit hydraulique dès le début du freinage. En effet, l'expérience montre qu'on ne sollicite pas le freinage au maximum, même lorsqu'on y est volontairement incité. L'AFU prend en compte la vitesse à laquelle le conducteur appuie sur la pédale de frein : même s'il n'exerce pas une pression suffisante, sous l'effet de la surprise son mouvement est rapide. Ce comportement permet à

l'AFU de détecter l'urgence. Dès lors, il commande une surpression dans le circuit hydraulique de freinage jusqu'au seuil de déclenchement de l'ABS. Les capacités de freinage de la voiture sont ainsi pleinement exploitées dès les premiers mètres.

IV-2-B-c- Apport de la démarche

Les résultats issus des situations réelles nous ont fait nous interroger sur la capacité des conducteurs à utiliser nos aides au freinage. Ils nous ont incités à reproduire sur piste, de façon contrôlée, des situations réalistes impliquant des freinages d'urgence pour constater les réelles capacités des conducteurs avec une évaluation précise.

Pour avoir des réponses objectives à ces questions, nous avons fait en sorte de reproduire les situations critiques au plus près de la réalité, tout en préservant la sécurité des participants et du copilote. Les véhicules étaient équipés de capteurs permettant de quantifier les actions des conducteurs, et les enregistrements physiologiques avaient deux objectifs :

Prouver le réalisme de la situation et assurer que les conducteurs avaient bien été confrontés à une situation d'urgence, sans se fier uniquement à leurs ressenti

Quantifier le coût cognitif associé à chaque freinage, et vérifier la capacité des conducteurs à se servir de tout le potentiel du système de freinage.

IV-2-B-d- Première expérimentation

1-Protocole expérimental

33 conducteurs ont participé à cet essai qui s'est déroulé sur circuit privé à bord d'une Renault 19 équipée d'un ABS mais sans aide au freinage d'urgence (AFU), celui-ci ayant été développé dans l'entreprise à l'issue de cette expérimentation. Les participants savaient qu'ils allaient devoir effectuer des freinages normaux

dont le but était d'améliorer les connaissances sur le comportement du conducteur. Ils étaient accompagnés d'un copilote dont le rôle était d'assurer la sécurité et de s'assurer du respect des instructions de vitesse (de 50 à 80 km/h suivant les endroits du circuit). La conduite durait 2 heures, pendant lesquelles, chaque sujet a réalisé 80 freinages, en réponse à des demandes de modification de vitesse données par des panneaux placés sur le bas coté de la piste. Pour éviter toute anticipation ou habitude les panneaux donnaient des indications de façon aléatoire, qui n'apparaissaient que lorsque la voiture passait devant une cible en amont. Ils pouvaient parfois demander de ne pas modifier la vitesse en cours. (figure n°36)



Figure 36 : Exemple d'instruction de décélération. Compte tenu de la vitesse actuelle, la vitesse de consigne est affichée sur le panneau placé sur le bas côté de la piste.

Les instructions de freinage se résument à 4 possibilités :

De 80 à 50 km/h

De 50 à 30 km/h

De 80 à 0 km/

De 50 à 0 km/h.

Ces choix correspondent à des décélérations allant de $-0.1g$ à $-0.6g$, soit des valeurs vécues quotidiennement par les conducteurs en situation réelle.

Enfin, à la place de l'allumage d'une consigne de réduction de vitesse, les conducteurs ont été confrontés à une situation critique matérialisée par une chute de bidons en plastique sur la chaussée juste devant leur véhicule, les obligeant à réaliser un freinage d'urgence. La décélération théorique requise

était cette fois de -1.2g (le tableau 6 montre que la mesure de la décélération réelle n'a atteint que -0.8g, en moyenne, lors des freinages d'urgence).

Les conducteurs étaient équipés d'électrodes permettant d'enregistrer en continu leur activité électrodermale. En parallèle, leurs comportements et actions de conduite étaient enregistrés ainsi qu'une vidéo de la partie avant de la route. Les actions de freinage ont été comptabilisées et les réponses électrodermales associées ont été quantifiées par la Durée de la Perturbation Ohmique (DPO). (Vernet Maury et al, 1995).

2-Résultats

Charge attentionnelle induite

Durée des réponses électrodermales associées au freinage

Lorsqu'une réponse était détectée lors d'un freinage, la DPO était analysée puis moyennée selon la catégorie de freinage réalisé.

On a réalisé une ANOVA (analyse de variance) à mesures répétées pour les 5 conditions de freinage : $F(4, 104) = 31.2, p < .0001$

Les DPO associées à des freinages légers (50 à 30 km/h, 50 à 0 km/h and 80 à 50 km/h) correspondent à une décélération comprise entre 0.2 et 0.3g, ne sont pas différenciables. Par contre, les freinages plus appuyés (80 à 0 km/h) et, en particulier, les freinages d'urgence induisent une augmentation significative de la DPO en comparaison aux freinages légers.

Les comparaisons 2 à 2 sont résumées dans le tableau 7.

	50_0	50_30	80_0	80_50	Urgence
50_0		t=1.43, NS	t=-4.76, p<.0001	t=-0.46, NS	t=-6.11, p<.0001
50_30			t=-4.45, p=.001	t=-1.66, NS	t=-7.68, p<.0001
80_0				t=3.63, p=.01	t=-5.6, p<.0001
80_50					t=-6.27, p<.0001
Urgence					

Tableau 7 : comparaisons 2 à 2 des DPO associées à chaque type de freinage

Performance du freinage d'urgence

Après analyse détaillée des freinages réalisés en situation d'urgence, les 33 conducteurs ont été répartis en 7 typologies de freinage comme le détaille la figure 31.

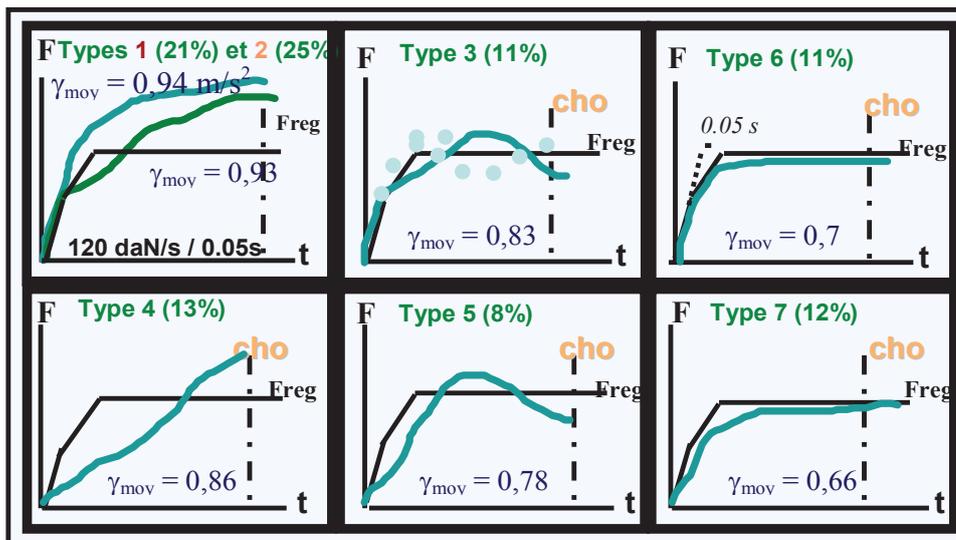


Figure 31 : répartition et détails des 7 typologies de freinage en situation d'urgence (Voir les commentaires dans le texte).

Les courbes colorées symbolisent la pression de freinage appliquée par les conducteurs dans la situation d'urgence. La partie horizontale de la courbe Freg symbolise la régulation ABS. Celle-ci ne peut donc être atteinte que si la courbe de pression produite par le conducteur croise le trait horizontal noir.

Moins de la moitié des conducteurs sont parvenus à utiliser toute la capacité de leur freinage (types 1 et 2) en atteignant rapidement la régulation ABS et en maintenant leur effort de freinage pendant toute sa durée. À l'inverse, les conducteurs des catégories 6 et 7 ont appuyé trop légèrement sur la pédale de frein et n'ont jamais pu déclencher l'ABS pendant toute la durée du freinage. Leur freinage était en conséquence loin d'être optimisé et la distance d'arrêt a été fortement allongée

Les types 3, 4 et 5, quant à eux, ont réussi à déclencher l'ABS mais de façon tardive, ce qui leur a fait perdre du temps pour arriver en capacité maximum de freinage. Parmi ces trois catégories, seul le type 4 a maintenu l'effort de freinage jusqu'à l'arrêt alors que les autres ont relâché leur appui et réduit encore leur performance.

3- Conclusion

Les réponses électrodermales - aussi bien par leur occurrence que par leur durée - ont montré que les freinages que nous réalisons quotidiennement et, souvent de façon automatisée, s'accompagnent en réalité d'une charge mentale spécifique, pouvant être coûteuse lors des freinages appuyés. L'occurrence et la durée de ce traitement sont donc intimement liées à la préparation motrice nécessaire pour réaliser l'action, même si celle-ci relève d'une liaison sensori-motrice, mémorisée lors de l'apprentissage et qui s'est largement automatisée au cours de l'expérience. La DPO nous permet de quantifier objectivement l'activation orthosympathique induite par l'exigence de la situation. Plus elle est élevée, (freinages avec fortes décélérations) plus le système activateur de l'organisme est stimulé, ce qui se traduit par un allongement de la RED.

Malgré cette forte mobilisation orthosympathique, la qualité du freinage d'urgence est restée faible pour la plupart des conducteurs. On ne peut pourtant pas attribuer cette réaction inadaptée à un manque d'implication dans la manœuvre, car les valeurs physiologiques prouvent la forte crédibilité de la mise en situation.

Les 33 participants ont, en fait, exactement reflété par leur comportement en situation expérimentale, celui de leurs homologues en situation réelle. La seule explication à la mauvaise performance globale est la faible capacité des conducteurs à interagir avec le système de freinage, essentiel de la sécurité automobile. À leur décharge, trois explications contribuent à interpréter ce résultat :

La plupart des conducteurs ont appris à conduire sur des véhicules non équipés d'ABS et ont conduit longtemps ensuite des véhicules dépourvus de ce système. Ils ont appris à éviter de bloquer les roues de leur véhicule et risquer de perdre son potentiel d'adhérence et de freinage. Le principe était d'éviter d'appuyer à fond sur la pédale de frein et plutôt la relâcher régulièrement. Dans les faits, ces principes théoriques, bien que connus des conducteurs, sont rarement appliqués. La soudaineté de la situation et le manque de confrontation à une situation critique de freinage d'urgence conduisait généralement à un blocage des roues suivi d'une difficulté à conserver le contrôle du véhicule.

La seconde raison est que, bien que les véhicules actuels soient tous équipés d'ABS, les candidats au permis de conduire testent rarement le système pendant leur apprentissage, pour des raisons compréhensibles de sécurité.

La troisième raison est que la plupart des conducteurs n'ont heureusement jamais ou rarement été soumis à une situation critique nécessitant un freinage d'urgence.

L'utilisation de l'ABS est donc extrêmement peu fréquente et l'on sait que tout apprentissage- pour qu'il soit efficace- nécessite au minimum une première mise en situation mais aussi un entraînement.

Il résulte de cet ensemble de points pénalisants que la plupart des conducteurs, confrontés à une nécessité de freinage d'urgence, n'ont pas acquis l'automatisme de fournir un effort suffisamment important sur la pédale de frein, ni celui de le maintenir jusqu'à l'arrêt. Ils ont, en effet, tendance à relâcher prématurément la pression sur la pédale, bien avant que la voiture ait suffisamment ralenti. Ce sont 2 mésusages qui allongent considérablement les distances de freinage.

Cette double constatation a conduit les ingénieurs à développer l'AFU, un système d'aide au freinage, qui permet à tous d'atteindre la régulation ABS le plus rapidement et le plus longtemps possible en assurant le maintien de l'effort. Par conséquent, tout le potentiel de freinage du véhicule est utilisé en combinant ABS et AFU.

IV-2-B-e - Deuxième expérimentation

1- Protocole expérimental

Les cent conducteurs volontaires recrutés avaient leur permis de conduire et une expérience de conduite supérieure à 3 ans, mais aucun n'était pilote professionnel. Au moment de l'essai, tous les véhicules de la gamme n'étaient pas encore systématiquement équipés d'ABS. Le véhicule utilisé l'était mais, pour les besoins du protocole expérimental, l'ABS pouvait être désactivé.

Quatre groupes ont été constitués :

Le Groupe 1 a réalisé l'essai sur le véhicule avec ABS désactivé. Le véhicule était présenté au conducteur en début d'expérience comme dépourvu d'ABS, à titre informatif parmi un certain nombre d'autres informations techniques.

Le Groupe 2 a réalisé l'essai sur le véhicule avec ABS activé, en étant juste informé de la présence de ce système sur le véhicule, parmi un certain nombre d'autres informations techniques.

Le Groupe 3 a réalisé l'essai sur le véhicule avec ABS activé, et les participants étaient informés du rôle de ce système juste avant l'essai.

Le Groupe 4 a réalisé l'essai sur le véhicule avec ABS activé et avait bénéficié deux mois avant l'essai d'une formation théorique et pratique à l'usage de ce système.

La répartition des participants dans les 4 groupes à été réalisée de manière à obtenir une répartition homogène en âge, ancienneté de permis et capacité à

réagir à une situation stressante (évaluée à partir du test de Stroop - Stroop, 1935). Au final, parmi les 100 essais effectivement réalisés, 67 seulement ont pu être retenus, soit à cause de configurations situationnelles trop différentes de la moyenne (par exemple : vitesse de roulage trop faible), soit à cause de défaillances techniques d'enregistrements. Ces 67 personnes se répartissent de la façon suivante dans les 4 groupes : 17 dans chacun des 3 premiers et 16 dans le groupe 4.

Le parcours sur circuit privé comportait une route à deux voies (d'une largeur de 7 mètres) avec un seul sens de circulation, avec des lignes droites, des virages à faible rayon de courbure, et plusieurs intersections dont deux avec des marquages horizontaux et verticaux « stop » pour la voie croisée par le véhicule d'essais. Ce circuit est une boucle que le conducteur devait réaliser 4 fois consécutives. Lors des 3 premiers tours, des conducteurs sont arrêtés au stop. Cependant, les intersections étant masquées de loin à la vision des conducteurs, la présence ou non d'un véhicule à l'intersection était visible au dernier moment seulement. Chaque participant a effectué 3 tours, chacun d'eux durant environ 4 minutes, soit un temps total d'essai de 12 minutes. Les vitesses de consignes étaient de 100km/h en ligne droite et 80km/h dans les virages. Un expérimentateur, pilote chevronné, était assis à côté du participant pour s'assurer du respect des consignes et de la sécurité. Après le deuxième passage à une des intersections, le véhicule réel qui se trouvait arrêté au stop était remplacé (à l'insu du participant) par un leurre gonflable, de mêmes forme et volume que ce dernier. Au troisième tour, le véhicule d'essai passe devant des barrières optiques qui envoient un signal de déclenchement du démarrage de la voiture leurre sur la voie de roulage (par un système de traction automatisé). La configuration du circuit fait que le conducteur ne voit que tardivement l'obstacle s'est engagé sur sa voie. Ce dernier traverse seulement la première moitié de la route, s'immobilise sur la voie de circulation du conducteur participant à l'expérience mais laisse libre la voie de gauche, permettant ainsi une échappatoire au conducteur. Compte tenu de la vitesse de roulage de 100km/h et

d'un temps de réaction moyen estimé à 800 ms, il manquait environ 15 mètres pour qu'un freinage pur soit suffisant pour éviter l'obstacle. Cette configuration constitue donc une situation très difficile à contrôler où la seule bonne réaction, pour éviter la collision, est de coordonner un freinage maximal avec un braquage du volant à gauche pour changer de voie. En cas de freinage seul, le choc est inévitable. La figure 32 montre un exemple de mauvaise manœuvre.



Figure 32 : exemple de mauvaise manœuvre : le conducteur de la voiture d'essais a peu freiné et n'a pas essayé d'éviter l'obstacle.

2- Résultats

Performances de manœuvre

Les manœuvres ont été classées en deux catégories, selon que les conducteurs se contentaient de freiner à la vue de l'obstacle (le freinage seul impliquant la collision, la manœuvre sera dite incorrecte) ou selon qu'ils coordonnaient freinage et braquage du volant (la manœuvre sera dite correcte).

Les résultats pour les 4 groupes sont résumés en Figure 33.

Il n'existe pas de différence significative entre les performances des 3 premiers groupes. Par contre, ceux du groupe 4 sont différents des 3 autres. Le test de Fisher atteste une différence entre les groupes 1 et 4 ($p = 0.03$), 2 et 4 ($p = .01$) ainsi que 3 et 4 ($p = .01$).

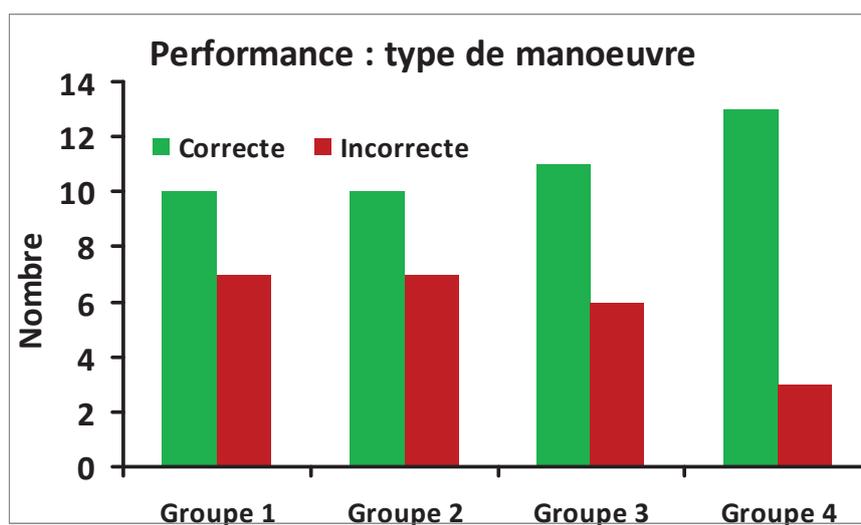


Figure 33 : performance de manoeuvre réalisée selon le groupe d'appartenance du sujet.

Charge mentale induite

Deux types d'analyses ont été effectuées : la première en fonction de la manoeuvre correcte ou incorrecte, la seconde en fonction du groupe d'appartenance des sujets, autrement dit, selon qu'ils étaient mis au courant de la présence du dispositif ABS avec une formation théorique et pratique préalable (groupe 4), ou juste avec une information technique (groupe 3), ou encore simplement avec la connaissance de sa présence (groupe 2) ou de son absence (groupe 1).

Dans cette expérimentation, en plus de l'activité électrodermale, on a enregistré la fréquence cardiaque instantanée des conducteurs. Nous avons constaté que, quelle que soit la manoeuvre et le résultat associé, la réponse cardiaque était forfaitaire. Elle se manifeste par une augmentation brusque, de forte amplitude,

pendant une courte durée. La réponse moyenne est une augmentation de 40 battements/mn, et chez certains sujets, elle a pu atteindre +80 battements/mn. Ces résultats présentés dans les figures 34 et 35, reflètent la charge élevée induite par la situation et valide, indirectement le réalisme de la situation expérimentale.

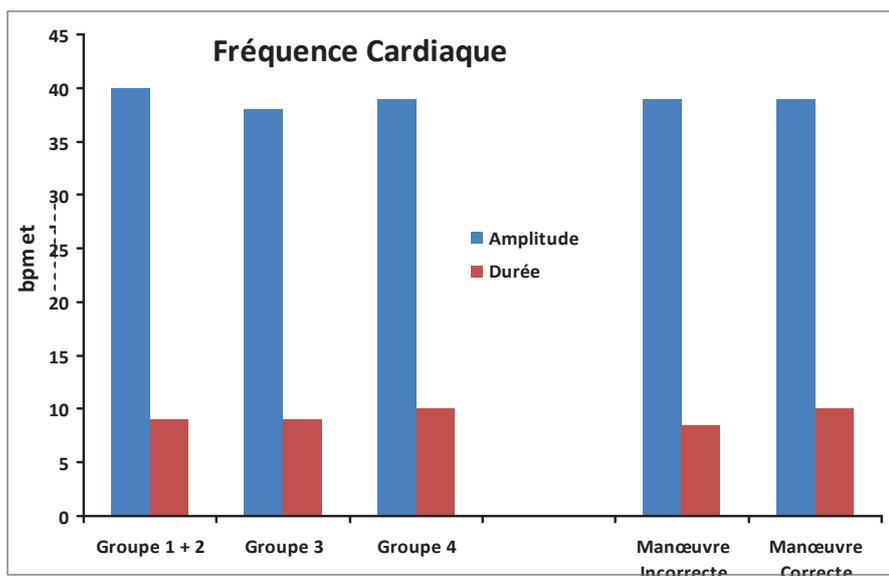


Figure 34 : amplitude (en battements par minute) et durée (en secondes) de la perturbation cardiaque selon le groupe d'appartenance et la manœuvre réalisée.

Les réponses électrodermales, mesurées par la DPO, sont observées dès l'instant où la voiture obstacle fait irruption sur la piste. Elles sont facilement repérables sur l'enregistrement car elles se différencient nettement de l'activité spontanée, ce qui confirme l'intensité du stimulus perçu par les participants. Contrairement au signal cardiaque, la DPO varie avec la qualité de la performance : elle différencie les manœuvres correctes des manœuvres incorrectes en étant significativement plus longue pour les premières (médiane à 17 secondes) que pour les secondes (médiane à 12 secondes). La valeur de U du test de Mann-Whitney est de 41.5, $p=0.02$. Ces valeurs sont les plus fortes que l'on n'ait jamais enregistrées lors d'essais de conduite sur piste ou sur route. Cela atteste l'intensité de la charge mentale subie par les conducteurs. Quand on

met la valeur de la DPO en relation avec le groupe d'appartenance des sujets, on observe qu'elle est plus élevée dans le groupe 4 (médiane à 19 secondes) que dans le groupe 3 (médiane 16 secondes) et les groupes 1 et 2 (médianes à 13 secondes). Ces différences ne sont significatives qu'entre le groupe 4 et les groupes 1 et 2.). La valeur de U du test de Mann-Whitney est de 20.5, $p=0.04$. Les résultats sont regroupés dans la figure 35.

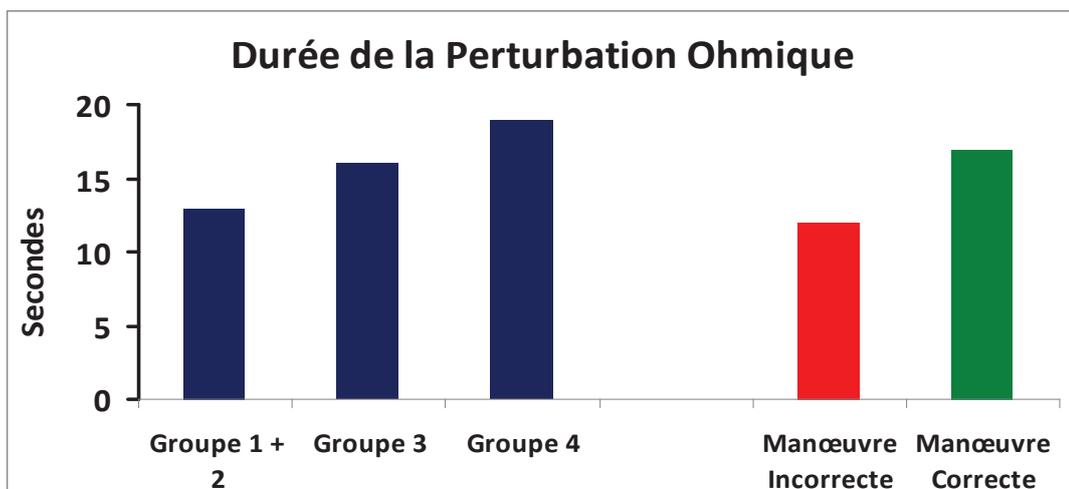


Figure 35 : durée de la réponse électrodermale (Indice DPO, en secondes) selon le groupe d'appartenance (partie gauche) et la manœuvre réalisée (partie droite).

Si l'on sépare les conducteurs en deux groupes en fonction de leur capacité ou pas à réaliser la manœuvre adaptée à la situation critique, on constate que leur niveau d'activation pendant toute la durée de la conduite précédente est significativement différent. Les conducteurs qui ont réalisé la manœuvre adaptée avaient un niveau d'activation plus élevé que les autres dès le démarrage et jusqu'à la situation critique. Cette activation plus élevée s'est traduite par un niveau tonique plus bas de la résistance cutanée comme le montre la figure 36.

Niveau tonique de la résistance cutanée pendant la conduite

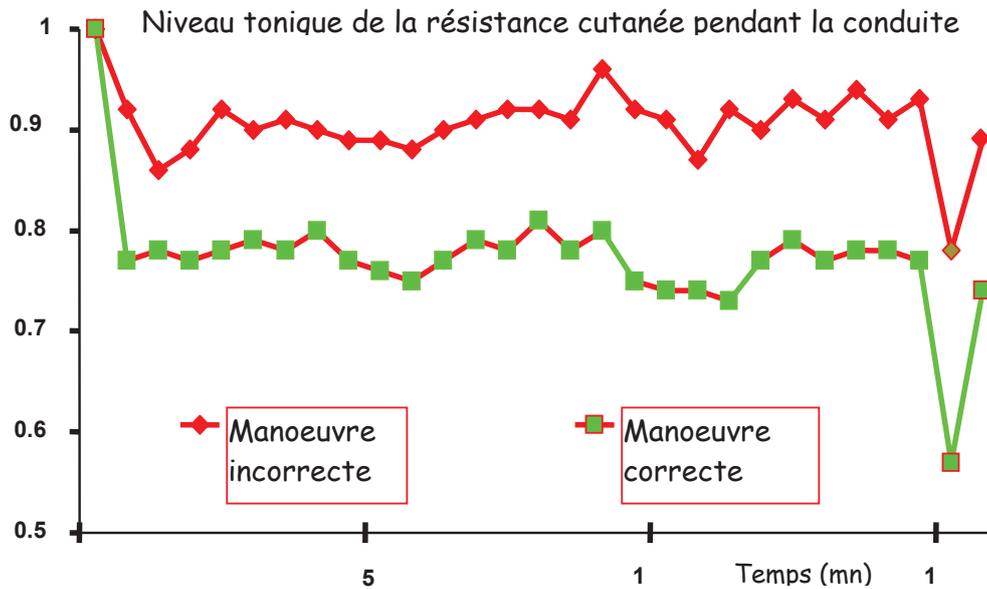


Figure 36 : Valeurs normalisées du niveau tonique de la résistance cutanée pendant la conduite : les conducteurs qui ont réalisé la manœuvre adaptée présentaient un niveau d'activation plus élevé (niveau tonique de la résistance cutanée plus bas)

De même, après l'essai, on a comparé le niveau de résistance au stress des conducteurs, obtenu un mois avant par le test de Stroop décrit précédemment. Il apparaît que les conducteurs les moins résistants au stress ont statistiquement moins bien réussi la manœuvre demandée, comme le montre la figure 37.

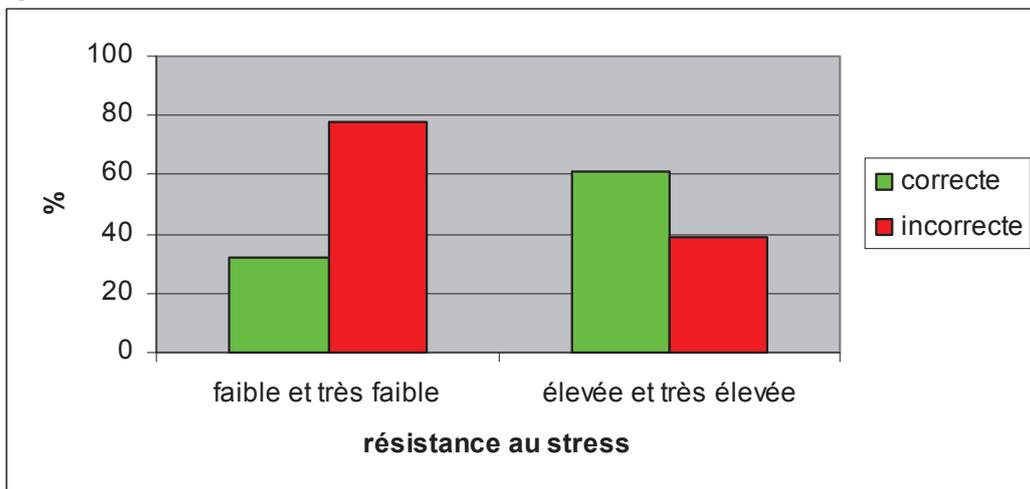


Figure 37 : capacité à réaliser la manœuvre adaptée en fonction de la résistance au stress

3- Conclusion

Ces résultats montrent qu'il ne suffit pas seulement de posséder un système de freinage performant (groupe 2), ni de savoir comment il fonctionne (groupe 3) pour obtenir des résultats probants dans une tâche d'évitement de choc sous forte contrainte temporelle. À l'inverse, le groupe 4 ayant déjà expérimenté une situation similaire durant sa formation, a mieux su trouver la réponse comportementale adaptée, même sous charge mentale élevée, comme en a témoigné l'intensité de la réponse cardiaque. Les sujets ont su rappeler la bonne stratégie adéquate et reproduire les opérations et techniques apprises 2 mois plus tôt. Le déploiement de cette stratégie adaptée se manifeste également à travers la DPO. La charge émotionnelle contribue à allonger cette durée. C'est la sensibilité du signal électrodermal à la charge de la situation qui apparaît là. Néanmoins, les valeurs sont significativement différentes selon la qualité de la manœuvre. La sensibilité du signal à la charge supportée par les conducteurs pour résoudre le problème montre bien que ceux qui ont coordonné freinage et évitement, malgré la très courte durée de la situation, présentent une réponse électrodermale plus longue. C'est la complexité du traitement cognitif qui peut le justifier : coordonner 2 actions complexes induit une charge résultante supérieure à l'exécution d'une seule action, le freinage.. Nous raisonnons ici sur la difficulté objective de la tâche. Par contre, nous pouvons également considérer que la charge émotionnelle (situation critique avec risque de collision grave, compte tenu de la vitesse du véhicule) est un facteur important de la réponse physiologique. Néanmoins, la réponse électrodermale ne différencie pas la part du cognitif et de l'affectif et elle reste globale, intégrant ces 2 dimensions du comportement. La réponse cardiaque reflète sans doute davantage la charge émotionnelle. On aurait pu faire l'hypothèse d'une réponse différenciée en fonction de la qualité de la manœuvre, mais elle reste principalement dépendante de la dimension affective et moins de la dimension cognitive de la charge mentale globale.

V Mise en place d'une formation basée sur la mise en situation et l'utilisation pertinente des systèmes d'aide.

V-1 rappel du contexte réel

Les exemples donnés dans le chapitre précédent montrent que la prise en main des systèmes et leur bonne utilisation par le conducteur nécessitent une familiarisation, voire un apprentissage.

Le conducteur de véhicule particulier, contrairement à tout autre opérateur en interaction avec un système, n'est pas un professionnel. Pour lui, la conduite a une fonction utilitaire et, pour cette raison, mise à part la formation initiale qu'il aura reçue pour accéder au permis de conduire, il ne bénéficiera plus, au cours de sa vie de conducteur, de remise à niveau, ni d'aide à la prise en main de nouvelles technologies. Or, les systèmes d'aide à la conduite automobile ont beaucoup évolué en 2 décennies. En effet, les constructeurs ont fait d'énormes progrès dans la conception des véhicules où les systèmes d'aide se sont multipliés. Bien évidemment, cela va dans le sens de l'amélioration de la sécurité et du confort des occupants, mais, on a vu dans le chapitre précédent que certains mésusages, mauvaises connaissances, peuvent annihiler tous les bienfaits d'un système d'aide, voire les transformer en sur-risque pour la conduite.

Les conducteurs de tous âges sont concernés par cette question qui ne touche pas seulement ceux qui ont passé leur permis avant l'apparition de ces systèmes. Evoquons ces différentes populations qui partagent la route.

Commençons par les conducteurs seniors qui ont passé leur permis il y a environ 50 ans, période où les véhicules étaient beaucoup moins nombreux mais également beaucoup moins sûrs, aussi bien en termes de sécurité active que

passive : de moins bons système de freinage et une structure peu protectrice pour les occupants. On peut faire la même analogie avec les infrastructures utilisées à cette époque : moins développées et moins sûres : moins d'autoroutes, davantage de villes traversées par des routes nationales, de routes à double sens à 2 ou 3 voies entraînant des interactions incessantes entre deux flux opposés, davantage de croisements et, au final, un facteur de risques d'accidents plus élevé.

Ces conducteurs, malgré leur grande expérience, cumulent de nombreux points pénalisants. Ils ont construit leurs principales habitudes de conduite sur des voitures aujourd'hui obsolètes, avec des réglementations qui ont été régulièrement remises à jour au cours des dernières décennies : port de la ceinture obligatoire, baisse des limitations de vitesse, etc. Les systèmes d'aide que nous avons étudiés dans les chapitres précédents sont apparus alors qu'ils avaient déjà au moins 30 ans d'habitudes de conduite au moment de les acquérir. On sait que l'apprentissage est d'autant plus aisé que l'on est jeune, et c'est particulièrement vrai pour l'auto apprentissage, c'est-à-dire la volonté de découvrir quelque chose de nouveau. Un autre point important à soulever est que l'introduction puis l'invasion des nouvelles technologies dans le monde automobile ont suivi celles du monde industriel et domestique (ordinateurs, téléphones portables, etc.); presque au moment où ces conducteurs maintenant seniors, étaient en fin de carrière professionnelle, et avaient eu peu ou pas d'occasion d'être confrontés à toutes ces nouvelles techniques impliquant des interfaces homme-machine et nécessitant un nouvel apprentissage. L'avancée dans l'âge fait que leurs temps de décision et de réaction sont plus longs que la moyenne et cette altération des facultés cognitives peut également les pénaliser dans l'usage des systèmes d'aide, surtout sous contrainte temporelle. C'est enfin pour eux que la force des habitudes prises est la plus dure à remettre en question et à modifier. Pour ne citer qu'un exemple, ce sont ces conducteurs là qui ont été les plus réfractaires à accepter le port de la ceinture de sécurité, puisqu'ils avaient passé des décennies à conduire sans.

Viennent ensuite les conducteurs d'âge moyen (de 35 à 65 ans). Ceux-ci ont également passé leur permis sur des voitures non équipées de systèmes d'aide ; mais ils ont bénéficié plus tôt dans leur vie de conducteur de l'apparition des mesures de sécurité et de l'introduction de nouveaux systèmes, ainsi que du changement des infrastructures routières et ont été rapidement confrontés à l'augmentation du nombre des usagers sur la route. Ils ont également vécu, dès le début, ou assez tôt dans leur parcours professionnel, l'introduction des nouvelles technologies et ont pu s'adapter plus facilement à leur utilisation, ce qui a dû faciliter la prise en main des systèmes d'aides et de leurs interfaces.

Arrivent enfin les jeunes conducteurs, génération ayant baigné dès son plus jeune âge dans l'usage des nouvelles technologies (ordinateurs, téléphones mobiles, consoles de jeux électroniques) dont ils peuvent difficilement se passer. Les interactions avec les interfaces semblent donc plus intuitives pour eux mais ils ont comme handicap majeur d'avoir peu d'expérience de conduite et de devoir consacrer toute leur attention à la conduite, ce qui peut les pénaliser dans l'utilisation des systèmes d'aide, en particulier sous contrainte temporelle forte. Malgré ces grandes différences générationnelles, tous ces conducteurs, jeunes ou vieux, novices ou expérimentés, ont un point commun : aucun n'a appris à se servir d'un système d'aide du type ABS ou régulateur de conduite (pour ne citer que ceux détaillés dans ce mémoire) en situation réelle, au cours de son apprentissage de la conduite. De nos jours encore, les jeunes en conduite accompagnée ou en apprentissage du permis utilisent des véhicules équipés de ces systèmes mais ne sont pas formés à leur utilisation en situation critique. La plupart des auto-écoles n'ont, en fait, comme terrain de roulage que l'infrastructure partagée par tous les autres usagers de la route, et il est compréhensible- bien que regrettable- que les apprentis conducteurs ne soient pas directement confrontés aux systèmes devant pallier les situations critiques, comme la perte de trajectoire ou le freinage d'urgence.

Au cours d'une vie de conducteur, il se peut qu'aucune situation de ce type ne soit rencontrée mais si c'est hélas le cas, la première fera office à la fois de découverte et d'apprentissage et pourra se solder par une fin dramatique.

Il existe de nombreux stages de conduite préventive ou conduite sûre qui ont été créés pour pallier ces risques et qui prévoient des mises en situation critique. Mais, d'une part, ils restent souvent à la charge du participant, (ce qui peut réduire notablement le taux d'inscriptions) et, d'autre part, ils ne peuvent être axés sur la prise en main des systèmes d'aide, leurs interfaces dépendant de la marque du véhicule considéré.

V-2 description de la formation

Toutes les constatations issues à la fois de nos expérimentations et de l'analyse des exigences de la conduite évoquées dans le paragraphe précédent, nous ont amenés à mettre en place une formation dédiée à nos clients, prenant en compte les lacunes d'apprentissage et les possibles défaillances de conduite dues à une méconnaissance à la fois des limites de l'individu, de l'équipement du véhicule avec des systèmes d'aide.

Cette formation pour une conduite plus sûre a été créée début 2010 par Renault en partenariat avec ECF (Ecole de Conduite Française) et Overlease (Filiale de Renault pour la location longue durée aux clients des flottes et aux particuliers). Elle est, depuis juin 2011, proposée aux clients des flottes du Constructeur à travers un catalogue de services et est dispensée par le réseau ECF présent sur toute la France sous l'appellation : CAR+ Sécurité

ECF est connu pour son expérience en formations de conduite. Nous avons mis à profit leur excellente connaissance du conducteur et de ses usages de conduite, pour produire en partenariat, un module comportant deux catégories d'enseignements. D'une part, il nous a paru nécessaire de faire prendre conscience aux stagiaires des 3 types de limites évoquées ci-dessus : les leurs, celle de leur véhicule et celle de leur environnement, constitué de

l'infrastructure, des autres usagers, des conditions climatiques entre autres. D'autre part, et c'est en cela que nous nous démarquons des autres formations, nous avons absolument voulu que les conducteurs soient mis en situation d'usage des systèmes d'aide présents sur leur véhicule Renault, jusqu'à ce qu'ils les maîtrisent dans des conditions appropriées et sécurisées. Les formateurs ECF ont, au préalable, été sensibilisés spécialement à la partie concernant l'utilisation des systèmes d'aide Renault de manière à informer le personnel de l'entreprise au rôle, fonctionnement, conditions d'utilisation et limites des dispositifs d'aide à la conduite.

Le but est, qu'à l'issue de cette formation, les stagiaires :

- connaissent les avantages et les limites des aides à la conduite et des systèmes de sécurité.
- sachent localiser et manipuler leurs interfaces, et percevoir les effets de ces systèmes.
- sachent les utiliser en toute sécurité (ABS, AFU, limiteur et régulateur de vitesse).
- sachent comment les intégrer dans la stratégie de conduite.

Par exemple, cela suppose une démonstration sur la localisation et la manipulation du Limiteur et du Régulateur (bouton de mise en marche, manipulation volant et lecture du tableau de bord, position conseillée pour le pied droit lors de son utilisation).

La formation peut se faire à l'identique à bord du véhicule du stagiaire ou sur les véhicules auto-école d'ECF, tous étant des Clio équipées des systèmes décrits dans la formation.

V-2-A- Déroulement du Programme CAR + sécurité

•Méthodes et Outils Pédagogiques

- Mise en situation réelle sur des circuits urbains ou périurbains
- Véhicule de l'entreprise ou ECF

- Salle équipée de moyens multimédias
- Aire fermée à la circulation pour mise en pratique

•Effectifs

- Un groupe n'excédant pas 12 participants avec 3 formateurs

•Durée - 7 h 00

•Deux Ateliers théoriques

Comportement du conducteur et fonctionnement du système nerveux:

- les temps de réaction simple et complexe, la coordination de tâches durant la conduite, l'attention et le partage de l'attention, les différentes perceptions visuelles (vision locale et lointaine, le passage de l'une à l'autre, la recherche active d'informations), la prise de décision (s'assurer d'être vu en en décelant les indices, envisager une action tout en se ménageant une alternative, dans les situations complexes).

Mise à jour des connaissances sur le thème : Véhicule -Individu-
Environnement.

- Connaître les limites liées à l'environnement : fiabilité de la signalisation, événements imprévisibles, infrastructure routière, conditions climatiques, autres usagers et autres véhicules.
- Connaître les limites liées au véhicule : lois physiques et comportement du véhicule (masse, énergie cinétique, force centrifuge), distance de freinage et d'arrêt, tenue de route, adhérence, les pneus, aides à la conduite, risques liés au matériel transporté, problèmes liés au manque de visibilité (vision nocturne et conditions de circulation dégradées).
- Connaître les limites liées à l'individu : fatigue, distraction, charge mentale, aptitudes visuelles, usage de psychotropes (alcool, drogues, médicaments), maîtrise du véhicule et de ses interfaces.

• Trois Ateliers pratiques

Systèmes d'Aide - Mise en situation

- conseils sur l'utilisation du limiteur-régulateur et analyse des risques liés à une mauvaise utilisation

Systemes de Sécurité active - Mise en situation

- connaître et comprendre le rôle et l'utilisation optimale de l'ABS et de l'AFU.
- comprendre l'intérêt du respect des distances de sécurité

Systemes de Sécurité passive - Mise en situation

- comprendre l'intérêt du port de la Ceinture de sécurité en toutes occasions, même à très basse vitesse.

La journée s'achève par une synthèse et un bilan de l'action de formation.

Cette journée de formation à la conduite sûre, basée sur un ensemble d'ateliers théoriques et pratiques, a puisé dans les compétences d'ECF en matière de connaissance du comportement des conducteurs, et dans les acquis des expériences menées par Renault sur l'interaction avec les systèmes d'aide et de sécurité.

VI - Description de la Création d'un Service dédié aux conducteurs seniors, pour leur permettre une mobilité durable et responsable

VI-1 Préambule : une question d'utilité et de santé publique grandissante

Le niveau de risque d'accident des conducteurs seniors augmente pour être comparable à celui des jeunes conducteurs, mais pour des raisons différentes : prise de risque et manque d'expérience pour les plus jeunes ; dégradations des capacités et moindre adaptabilité aux évolutions de la route pour les plus âgés. En conséquence, la relation entre le taux d'accident et l'âge suit une courbe en U. Cette surexposition au risque routier de nos aînés, ajoutée au vieillissement de la population entraîne une nécessité sociétale de réflexions sur le maintien de leur autonomie et de leur indépendance, dans des conditions acceptables pour eux et pour les autres usagers de la route.

Le conducteur senior doit faire face à une triple problématique :

- s'adapter à une infrastructure, un trafic et des véhicules en perpétuelle évolution ;
- continuer à conduire pour préserver sa place à part entière dans la société ;
- reconnaître et gérer des dégradations éventuelles de ses fonctions sensori-motrices et cognitives.

VI-1-A- S'adapter à une infrastructure, un trafic et des véhicules en perpétuelle évolution

Le conducteur senior a reçu sa formation initiale au permis de conduire dans un contexte très différent d'aujourd'hui. Cette évolution se manifeste notamment par une diversité accrue des infrastructures et de la signalisation à repérer, à analyser et à prendre en compte.

Le trafic a considérablement augmenté et oblige sans cesse le conducteur senior à s'adapter au comportement des autres souvent plus rapide, plus pressé, voire agressif.

En conduite, la quantité d'information à traiter par unité de temps augmente. À cette contrainte plus élevée, se surajoutent, pour le conducteur senior, les déficits supposés de ses fonctions sensori-motrices et cognitives. En conséquence, la contrainte temporelle est, pour lui, de plus en plus forte.

Les véhicules actuels ont énormément gagné en sécurité en se dotant de systèmes de sécurité passive (protection de l'occupant en cas de choc) et de sécurité active (pour éviter le choc ou en réduire ses conséquences), et d'aide à la conduite (pour éviter de se mettre en situation critique). Ces systèmes sont très performants mais certains d'entre eux nécessitent une prise en main, voire un apprentissage, rarement prodigués par les vendeurs, faute de temps et de formation de ces derniers. En conséquence, certains systèmes pourtant particulièrement adaptés aux besoins des seniors, peuvent, par ignorance ou par crainte, ne pas entrer dans les critères de choix du véhicule.

VI-1-B- Continuer à conduire pour préserver sa place à part entière dans la société.

Un Senior privé de la possibilité de conduire perd son autonomie et, en conséquence, une partie importante de sa place dans la société. La perte d'autonomie de déplacement entraîne bien d'autres dégradations de la vie quotidienne : isolement, sentiment de dépendance, d'inutilité ...

VI-1- C - Reconnaître et gérer les dégradations de ses fonctions sensori-motrices et cognitives.

Avec l'avancée de l'âge, l'être humain est confronté à des dégradations progressives, plus ou moins sévères des capacités sensorielles, motrices et cognitives.

Les dégradations sensorielles qui altèrent particulièrement la conduite sont la vision, l'audition et même la proprioception.

Les dégradations motrices qui rendent la conduite moins sûre sont une rigidité des articulations et une baisse du tonus musculaire avec pour conséquences, un contrôle moteur moins précis et une prise d'information plus difficile (l'arthrose cervicale, par exemple, limite la rotation du cou et gêne la prise d'information directe, dans l'espace latéral et arrière).

Les dégradations cognitives qui affectent la conduite sont :

- Une baisse de l'attention
- Une augmentation du temps de prise d'information (choix de l'information utile dans une situation de conduite nouvelle).
- Une augmentation du temps de prise de décision sous une contrainte temporelle forte
- Une diminution de la pertinence de la prise de décision
- Une altération des accès en mémoire de travail, avec probablement une réduction de la capacité et de la durée de rétention.

Ces opérations cognitives sont certainement perturbées par la charge émotionnelle induite par la conduite elle-même. Cette charge émotionnelle peut sans doute aller jusqu'au renoncement à se déplacer de façon autonome.

Les tests qui mesurent les dégradations sensorielles, motrices et cognitives sont connus et appliqués dans le domaine de la gériatrie. Cependant, les cliniciens s'accordent pour révéler une faible corrélation avec la performance en conduite automobile.

Par ailleurs, certains tests conçus pour évaluer la capacité à la conduite automobile, montrent une fiabilité limitée, ne serait-ce parce qu'ils utilisent l'outil informatique, dont la maîtrise plus ou moins bonne peut biaiser les résultats (utilisation de la souris par un senior, par exemple).

VI-2- Objectif du projet

L'entreprise Renault souhaite, avec ses partenaires (l'Université Claude Bernard de Lyon et l'Association ECF) mettre à disposition de ses clients seniors un service d'accompagnement pour leur assurer une mobilité durable.

Afin que les conducteurs seniors conservent leur indépendance sociale, ce projet a pour objectif de leur permettre d'avoir une meilleure connaissance d'eux-mêmes pour :

- Savoir identifier et reconnaître les dégradations éventuelles de leurs fonctions sensori-motrices et cognitives.
- Découvrir et adopter des solutions efficaces et durables pour pallier ces dégradations.
- S'adapter à l'évolution de l'infrastructure, du trafic et des véhicules.
- Continuer à conduire en toute sécurité pour eux et pour les autres usagers de la route.

VI-3- Descriptif du produit final

Proposition d'un service de formation à la conduite sûre et durable pour les conducteurs seniors, mis en place dans le réseau Renault, et proposé et déployé par le réseau ECF.

Ce service consistera en une session initiale d'une journée de découverte, de sensibilisation et de formation, composée d'ateliers théoriques et pratiques adaptés à la problématique liée à la conduite des seniors.

Ce service a pour but de faire gagner de la compétence de conduite en modifiant le comportement des personnes âgées, qui tiendront alors davantage compte de leurs dégradations cognitives et motrices (lesquelles ne peuvent, de toute façon, pas être restaurées).

Il aura également la particularité d'assurer un suivi des clients via les réseaux Renault et ECF, permettant le maintien des connaissances acquises au cours de la session.

VI-4- Déroulement de l'étude préalable

VI-4 -A- Construction de la journée de découverte et sensibilisation initiale

La première étape a consisté en la conception de méthodes attractives d'évaluation initiale, et d'outils accessibles à tous, quelle que soit la catégorie socioprofessionnelle des stagiaires. Elle vise à :

a) mettre à niveau les connaissances sur le code de la route, actualiser ou découvrir des nouveautés (série de questions-réponses sur les évolutions lors des 25/30 dernières années).

b) quantifier l'état des fonctions sensori-motrices et cognitives, en relation directe avec l'action de conduite. Les capacités conséquentes seront mises en évidence avec les outils suivants déjà utilisés par ECF (ou équivalents) :

- ERGOVISION apporte des mesures relatives à l'acuité visuelle et sur le temps de récupération après éblouissement. On accède aussi aux capacités de vision nocturne.

- REASCOPE mesure le temps de réaction à un signal auditif et visuel.
- PRISME permet l'évaluer la capacité à prendre des informations utiles dans une situation de conduite.
- Sur le plan moteur, on évaluera l'amplitude articulaire générale et particulièrement celle des vertèbres cervicales afin d'évaluer la mobilité pour la prise d'information depuis l'habitacle.
- c) identifier les alertes, à l'aide de signes concrets qui peuvent correspondre à ce que les tests ont mis en évidence.
- d) faire prendre conscience des facteurs aggravants : prise de médicament (repérer les effets secondaires)
- e) proposer des stratégies palliatives
- f) présenter les systèmes d'aide à la conduite contribuant à atténuer les dégradations liées au vieillissement (radar de recul, par exemple, limiteur de vitesse ou GPS ...).

On a testé et validé, sur un panel de sujets seniors la capacité de ce dispositif à :

- leur permettre d'apprendre à pallier les dégradations de leurs performances de conduite, en situation écologique.
- développer des stratégies permettant d'améliorer leurs performances nécessaires à une bonne conduite.

Les qualités didactiques du dispositif doivent induire une motivation réelle pour la personne sollicitée et pas une épreuve qu'on aurait la crainte d'échouer. L'exigence est de concevoir et de construire des tâches graduées qui soient ajustées aux caractéristiques des populations âgées (distinction entre le 3^e et le 4^e âge, prise en compte de pathologies plus sévères, à côté des altérations normales liées au vieillissement).

L'aboutissement de ce travail consistera à proposer à nos clients seniors : la journée loisir-sécurité routière pour les conducteurs seniors.

VI-4-B- Elaboration d'un système de veille active pour le maintien des acquis.

A l'issue de cette journée de sensibilisation initiale, il est prévu de maintenir le contact avec les stagiaires afin de pérenniser leurs acquis. Ce suivi, assuré par les réseaux Renault et ECF, permettra de rester en contact avec les bénéficiaires et s'assurer de la durabilité de l'apport de cette formation.

Un quizz leur sera régulièrement envoyé par courrier ou par e-mail (selon leur choix) selon une fréquence qui reste à définir.

Ce quizz reprendra toutes les thématiques abordées pendant la journée initiale (connaissances du code, prise en compte de leurs capacités et de leur état physiologique, connaissance des systèmes d'aide les plus appropriés à leurs besoins, etc...), et permettra d'assurer la veille continue des acquis de la formation. Les réponses seront données dans le même courrier en précisant aux bénéficiaires que, pour parfaire ou entretenir leurs connaissances, ils pourront bénéficier de plusieurs services :

- venir assister gratuitement aux présentations thématiques relatives à l'évolution du code de la route dans le centre ECF le plus proche de leur domicile.
- ceux qui maîtrisent l'outil internet pourront également accéder au e-learning proposé par ECF.
- Ils seront également accueillis dans le réseau Renault pour tout renseignement concernant les systèmes de sécurité et les aides à la conduite les plus adaptés à leurs besoins.

Il est prévu de pouvoir proposer ce service aux clients seniors au courant de l'année 2012.

VII Conclusion

Les études du comportement du conducteur présentées dans ce mémoire avaient pour objectif initial de mieux comprendre les interactions entre l'utilisateur et les systèmes d'aide à la conduite mis à sa disposition. Elles se sont basées sur une approche objective, avec le choix de variables dépendantes quantifiables pour éviter tout biais lié à la seule approche subjective.

Nous avons ainsi développé et acquis une expérience forte en matière d'enregistrement et d'analyse de l'activité électrodermale en situation de conduite réelle.

Cet enrichissement des connaissances sur le sujet et l'intérêt qui y a été porté a conduit également au développement de systèmes d'enregistrements et d'analyses de plus en plus sophistiqués et parfaitement adaptés aux contraintes du roulage, aussi bien en situations nominales que critiques. On est passé ainsi d'un matériel imposant et lourd utilisé en laboratoire, à des systèmes moins invasifs, davantage ambulatoires et plus résistants aux sollicitations de roulage, développés en collaboration avec le laboratoire des Micro capteurs et des Microsystèmes biomédicaux de l'INSA de Lyon (MMB). On a fini par intégrer récemment des capteurs de signaux physiologiques dans les véhicules d'essais de manière à rendre la mesure plus transparente possible pour les participants. La collaboration recherche - industrie nous a permis de construire un système d'enregistrement intégré de l'ensemble des paramètres qui nous intéressent (liés au comportement du conducteur, à sa physiologie, au véhicule et à l'environnement). La plateforme UNOTECH (outil destiné à l'Utilisation des NOuvelles TECHnologies) est opérationnelle depuis 2007 (Clarion et al., 2009).

Les résultats obtenus au cours des études ont permis d'affiner les analyses et, en conséquence, de participer à la préconisation des choix ou la modification des systèmes en cours de développement au sein de l'entreprise.

On a évoqué- pour expliquer l'accidentologie réelle sur nos routes - la présence concomitante de conducteurs ayant des capacités différentes selon leur niveau d'expertise et leur âge. On a vu également, au gré des expérimentations réalisées, que des contraintes extérieures au conducteur pouvaient le mettre en situation critique. On a vu, enfin, que les véhicules ont beaucoup évolué en deux décennies, rendus plus sûrs mais obligeant les conducteurs à s'approprier de nouvelles technologies et les interfaces associées.

Ces trois aspects omniprésents et incontournables du quotidien des conducteurs ont rendu nécessaires des études approfondies de chacun d'entre eux pour pouvoir proposer des solutions améliorant la sécurité.

L'effet de l'âge et de l'expertise de l'individu sur la conduite ont été étudiés (Catchpole et al, 1994, Deramus, 2005) L'apport des systèmes de sécurité a également été démontré (Page et al., 2010). En revanche, peu d'études sur leur prise en main et leur utilisabilité en situation réelle, au moyen d'approches objectives ont été réalisées.

Les différentes expériences décrites, ainsi que celles présentées en annexes, ont contribué à montrer l'intérêt d'associer l'approche comportementale et l'approche physiologique du conducteur en situation réelle, lors de l'utilisation des systèmes d'aide et de sécurité. La majorité de ces études ont également démontré que la plupart des conducteurs, même expérimentés, n'étaient parfois pas en mesure de produire le comportement approprié dans certaines situations. Cette mauvaise adaptation au milieu est due à trois raisons majeures : la contrainte temporelle, la méconnaissance des systèmes utilisés, l'absence d'apprentissage à leur utilisation dans des situations critiques, rarement rencontrées.

Pour toutes les études citées, on s'est donc toujours attaché à étudier le comportement des conducteurs en les soumettant à la fois à la nouveauté mais également à une contrainte temporelle, rendant la situation de conduite critique, bien que non dangereuse car contrôlée au niveau de l'environnement (piste

sécurisée) et de la conduite (présence d'un copilote chevronné à côté de chaque participant). Ce n'est que de cette manière que l'on peut s'assurer qu'un système d'aide ou de sécurité, aussi performant soit-il techniquement, est réellement bénéfique à la sécurité de son utilisateur et aux autres usagers de la route. Chacune des expérimentations présentées a été menée en conditions les plus proches possibles de la réalité.

Ces études ont permis, par exemple, de réaliser que l'ABS, bien que potentiellement bénéfique sur le freinage, n'était réellement utilisé convenablement que par un quart des conducteurs le possédant, faute d'information, et encore moins de formation à son utilisation. Ces mêmes études ont permis de chercher un moyen pour les 75% de conducteurs incapables de le déclencher, d'accéder à la régulation ABS. L'AFU a ainsi été mis sur le marché par Renault, après que ses interfaces aient été testées lors du présent travail, toujours en conditions expérimentales : la mise en situation la plus réaliste possible.

Ce travail a eu également pour but de montrer l'intérêt d'étudier le comportement du conducteur par des mesures objectives : à partir des données mécaniques indirectes (en provenance du CAN du véhicule) et à partir de données physiologiques directes, enregistrées en conditions réelles avec des moyens ambulatoires. On a ainsi pu montrer que la contrainte temporelle pénalisait doublement les conducteurs en leur laissant peu de temps pour prendre la décision la plus adaptée au contexte, et en augmentant trop fortement leur charge attentionnelle.

Au fil des années, grâce à ces travaux, Renault est devenu l'un des rares constructeurs à associer cette approche physiologique à l'étude du comportement et des performances du conducteur.

Cette approche a fait aussi prendre conscience, non seulement des difficultés de certains conducteurs à interagir de manière adaptée avec les systèmes d'aide, mais aussi à la surcharge potentielle que pouvait entraîner l'utilisation de ces systèmes, s'ils n'étaient pas pris en mains de façon adéquate.

En confrontant cela aux études issues de la conduite réelle, ou même aux analyses d'incidents voire d'accidents, il est apparu que le manque d'apprentissage et la quasi absence de prise en main des systèmes d'aides, aussi bien en école d'apprentissage de la conduite qu'en concessions, étaient un point faible de la chaîne.

La double approche physiologique et comportementale de la conduite, initialement dédiée à la Recherche, a donc trouvé une deuxième application, non plus technique, mais dans le domaine du Service au Client. Depuis quelques années, les données accidentologiques démontrent que les accidents sont dus en grande majorité au facteur humain. Gageons que les propositions de formation à la conduite sûre et à la bonne utilisation des systèmes d'aide issues de ce travail, puissent contribuer à l'amélioration des interactions homme-systèmes, des comportements de conduite, avec comme conséquences attendues l'amélioration de la sécurité routière.

VIII Annexes: présentations en congrès d'études basées sur la même double approche du comportement du conducteur

VIII 1- Evaluation of a Time Warning Assistance system in the field through electrodermal response.

PIE (Psychophysiology in Ergonomics) conference - September 2004 - New Orleans

Claire Petit-Boulangier *, Caroline Ethève**, Christian Collet ***

*Renault Cars Manufacturer, **Université Paris V, ***Université Lyon 1 - France

claire.petit-boulangier@renault.com

Abstract

The aim of the experiment was to test the effect of the Human Machine Interface (HMI) associated to a Time Warning Assistance (TWA) on drivers' perception delay and mental workload. The TWA informed the driver when the time between his car and the vehicle ahead fell under the legal driving following time in France (2 seconds, until 2003). However, the true impact of the TWA must be studied to guarantee good acceptance and minimal delay of perception, to help drivers to manage critical situations. 50 participants were asked to drive on highways and secondary roads. When necessary, they were warned by the TWA through different sensorial modalities: visual, auditive and haptic (via the accelerator pedal), alone or associated. Electrodermal activity was continuously recorded while drivers test the TWA under five modalities: haptic; haptic and auditive; haptic and visual; auditive and visual; haptic, auditive and visual. Results showed that alarm perception delay was significantly reduced under the haptic modality. By analyzing skin resistance response, this modality also showed to induce the same workload as the others. The TWA through haptic information was the more efficient, i.e. the more significant for drivers because quickly perceived and easily understood.

Introduction

When a driving assistance is developed and validated, the next step is to choose the right Interface Human Machine to give the information (i.e the alarm) to the driver. The main question that ergonomists working for car manufacturers have to answer is : "how to be sure that the information transmitted by the assistance system is quickly and easily understood by the driver, without increasing his attentional load and reduce his safety ?" Different methods are usually used to understand the driver behavior: they

are often based on driving activity detailed descriptions or on subjective responses given by drivers themselves.

Method

Drivers' workload was estimated by electrodermal activity continuously recorded while they were using the system and its associated HMI. This method gives two main informations: the delay between the alarm is triggered and then perceived by the driver; and the workload associated to the understanding of the alarm. Fifty volunteers took part to the experiment driving during an hour on highways and secondary roads. They were divided in five groups as shown in Figure 1.

group H	haptic pedal alone (accelerator pedal hardening)	10 drivers
group H+V	haptic pedal + visual alarm (on dashboard top)	10 drivers
group H+S	haptic pedal + hearing alarm (buzzer)	10 drivers
group H+V+S	haptic pedal + visual and hearing alarms	10 drivers
group V+S	visual and hearing alarms	10 drivers

Figure 1: experimental groups

Cutaneous resistance was recorded. According to traditional recommendations (Fowles, Christie & Edelberg, 1981), sensors were placed on the second phalanx of the index and third digit of the nondominant hand. Resistance was measured with a 15 A DC current. A temporal index was used because response amplitude depends on the prestimulation value (Furedy & Scher, 1989). The time during which the participant "responds" to stimuli without referring to the initial value (or tonic level) defines the ohmic perturbation duration (OPD index) and reveals information processing by participants (Vernet-Maury et al.,1995). Those authors showed that the response ends with the increase, the curve showing no more fluctuations i.e. when the slope resembles that observed before stimulation. It was concluded that, at that accurate time, the stimulus had no more effect on the subject, i.e. mental processes elicited to process the stimulus were over. Thus, the response duration (the OPD index) was quantified between the sudden decrease of the curve and the end of intrinsic fluctuations. In the same paper, the OPD index was compared to more classical indices, i.e. different recovery times and was shown to be the more reliable

Results

300 responses to alarm were performed in each group ; ie a mean of thirty alarms per driver on an hour drive. This first result shows drivers' difficulty to know their driving following time, and therefore the benefit of such a system.

HMI perception delay according to sensory modality

In a previous study (Petit et al., 1998), phasic responses in electrodermal activity were strongly correlated with external events , on the one hand, and were shown to anticipate such stimuli when these could be expected.

Whatever the sensory modality, the mean perception delay is always less than 1.5 second (Figure 2), and when the haptic modality is available, the gain in perception is at least of 0.2 second and can reach 0.4 second. This statistically significant decrease (Fisher test : $p < 0.05$) shows the benefit of using such a sensory modality.

Drivers' workload according to sensory modality

Mean OPD index shown in Figure 3 was similar for all modalities. None of the alarms elicited a dramatical increase of the Attentional load. All OPD mean values were shorter than 3 seconds, without statistical differences between groups. In previous studies (Petit et al., 2002), these values were generally associated to common driving behaviors like looking to the speedometer or changing gear.

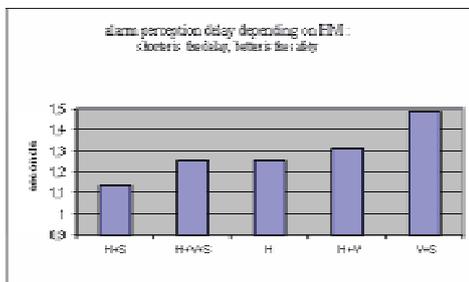


Figure 2 : mean skin resistance phasic response delay in each group.

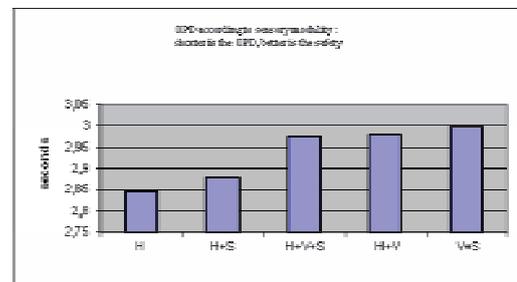


Figure 3 : mean skin resistance phasic duration in each group

Conclusion

The ideal solution for an HMI designer is to find a trade-off between the alert perception delay and the workload to such an alert. The best would be to lead to both a short perception delay and a small workload, not to impair driving and safety.

Time Warning Assistance, through haptic information seems to come up to our requirements. It is efficient, because quickly perceived and easily understood by drivers.

References

- Vernet-Maury E, Robin O, Dittmar A. The Ohmic Perturbation Duration : an original temporal index to quantify electrodermal response. *Behav. Brain Res.* 1995; 67: 103-107.
- Fowles DC, Christie MJ, Edelberg R. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiol*, 1981, 18, 232-239.
- Furedy JJ, Scher H. The law of initial values: Differentiated testing as an empirical generalization versus enshrinement as a methodological rule. *Psychophysiol.* 1989, 26, 120-121.
- Petit C, Capperon S, Roch H, Priez A. Electrodermal responses during driving on a dynamic simulator. *DSC - Paris - September 2002.*
- Petit C, Flegel P, Priez A, Collet C, Vernet Maury E, Dittmar A. Phasic electrodermal response specificity of drivers during different braking situations. *PIE 1998.*

VIII-2- Driver electrodermal responses on a dynamic driving simulator

DSC (Driving Simulation Conference) - September 2002 - Paris

Claire Petit, Stéphane Capperon, Hubert Roch and Alain Priez- Renault Research Department

Abstract

Human electrodermal response is already known to be able to quantify attentional load. Recorded while driving, it allows to evaluate objectively driver behavior associated with normal or critical driving situations.

Experiments were carried out on the Renault dynamic driving simulator with 30 volunteers. They were asked to drive as usual for 45 minutes and were subjected to several situations needing increased attention.

Electrodermal responses analysis showed that subjects adapted quickly to the driving task on that simulator. This analysis also conducted to a classification of different critical driving situations versus cognitive effort.

Introduction

The goal of each team in charge of building a driving simulator is to reach as much as possible real driving conditions realism. Two possibilities to validate this realism are to observe the driver behaviour (De Waard, 1996) or to give him subjective scale to fill in (Verwey and Veltman, 1995). Another possibility is to use physiological measures and particularly the indicators of the activity of the Autonomic Nervous System (ANS). ANS is well known to give estimation of subject's arousal especially through the ortho-sympathetic branch (Boucsein, 1993; Vernet-Maury et al., 1993). Variations in skin electrical phenomena are one of its indicators and the phasic response recorded just after a stimulus is a reliable indicator of information processing duration (Vernet-Maury et al., 1995). This method already allowed to quantify objectively the driver perception and his mental load associated to his driving behavior in real driving situation (Priez and Petit, 1993 and 1999). The purpose of this study is to use it on the dynamic simulator.

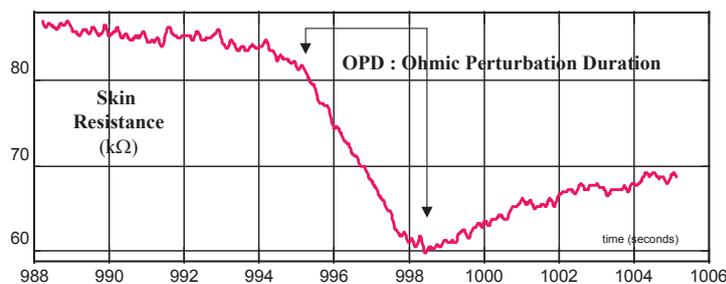
Materials and methods

30 male subjects between 26 and 55 years (mean = 38 years) participated to the driving task. They had been selected some weeks before the experiment on their absence of sickness during a 15 minutes driving test on the Renault dynamic driving simulator.

During the experiment, they were asked to drive as usual for 45 minutes. The main part of the driving was normal, with few traffic, but sometimes, drivers

were subjected to situations needing more attention or able to create stress : obstacle on the lane, telephone ringing located in the driver's door, lateral wind, inserting a CD into the CD player. A copilot was seated beside him to give him information or instructions.

Cutaneous resistance was recorded using 30 mm² unpolarizable, Ag/AgCl electrodes placed on the third phalanx of the index and the middle finger of the left hand (the right one moves too often during driving), held by adhesive tape. Resistance was measured with 15μA DC current. The analysis is then done on the temporal index of skin variation : the Ohmic Perturbation Duration (OPD) (Vernet-Maury et al., 1995). OPD is measured as early as the sudden fall which occurred simultaneously to stimulus onset. Then, it remains at a lower resistance level compared to the tonic level before stimulation. Finally, duration ends when the slope looks like that observed before. Thus, OPD is correlated to the duration during subject is under stimulation effect (cf figure below).



Results

For all the drivers, each electrodermal phasic response has been detected and its OPD measured. As the subject and the road were continuously filmed, each electrodermal response was associated to its particular stimulus.

At the beginning of the test, a 5mn duration drive was selected as a reference because it was a normal driving, without traffic nor special situation, and with normal weather. The copilot didn't give any instruction and the subject had just to perform a simple driving task. During that period, the mean OPD for all the drivers was 3.1 sec (± 1.6).

We wanted then to compare this first result to electrodermal responses recorded 10 minutes later in the test - always in a simple driving task like the first one - to know if there was or not a phenomena of high activation due to the novelty of the situation and then a possible adaptation of the driver. Therefore another 5mn duration drive was selected : its mean OPD was 2.6 sec (± 1.3). This OPD decrease was significant ($p < 0.0001$ - ANOVA test).

Electrodermal responses were also analyzed during each critical situation :

- A car was pulled up straddling the driving lane and the road side while another car was coming in the opposite direction : mean OPD = 7.1 sec
- A phone rang in the driver's door and he had to give it to the copilot : mean OPD= 5.8 sec
- The driver had to put a CD into the CD player : mean OPD = 4 sec
- Lateral wind: mean OPD = 3.2 sec

All those responses associated to each situation were significantly higher than those associated to the normal drive ($p < 0.0001$ - ANOVA test)

Discussion - Conclusion

The quick decrease of OPD values showed that the attentional load required by the simulated drive has been easily accepted. The use of the electrodermal measure is an objective way to conclude that driving on the Renault dynamic simulator doesn't require a long period of adaptation. Therefore, the main OPD value obtained is similar to those already recorded by our team in previous experiments realized in real conditions. Those results allow to validate objectively the realism of the Renault dynamic simulator in terms of cognitive load .

On the other hand, electrodermal measure gave a good idea of the attentional load associated to a specific situation in comparison with normal driving. The large increase of OPD values- particularly when the driver had to go off course because of a car stopped on the shoulder - showed that he is subject to a high attentional load, even in situations, which do not seem to be so critical.

The increase of the attentional load due to secondary tasks like picking the ringing phone or inserting a CD into the CD player is lower. When the unexpected event leads to a secondary task, the driver can decide to delay it when he feels confident with his primary task. The increase of the attentional load is effective because the driver has two tasks to realise in the same time but, as he can decide when to share his attention, his cognitive load is lower.

At the contrary, when the unexpected event concerns the primary task - ie the driving task- the driver has no delay to perform this task and he knows that there is a risk if he doesn't perform well (even in a simulator when it is realistic). Even if there is always only one task (the driving one), this task becomes suddenly more difficult to realize without being delayed and it needs more attention.

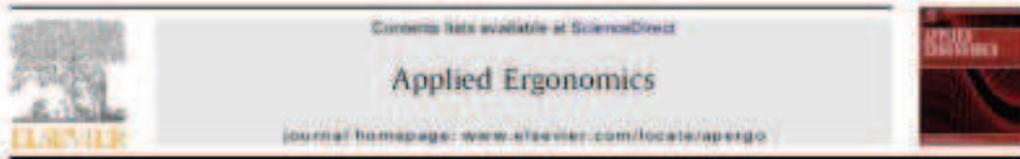
The attentional load increased when the subject had to drive with side wind because he had to take more care of his lateral deviation. But this increase was the lowest: it means that the cognitive process needed for this task was not very different from the one associated to a normal drive. Side wind is not perceived as a stimulus one have to react to, but as an evolution of the driving situation one just have to adapt.

In conclusion, this study shows the selectivity of electrodermal variations, able to differentiate several usual driving situations. It also confirms the good realism of the Renault dynamic simulator in terms of driver cognitive process. Attentional load associated to normal drive in the simulator is not different from the one previously recorded in real conditions. When the driver has to perform a secondary task or when his primary task becomes harder, the increase of his attentional load is similar to what it would be if he was in real conditions. Those results allow carrying on new experiments on that simulator to study and compare new systems, versus the attentional load they generate because we know now that the results obtained will be similar to those obtained in real conditions.

Bibliography

- Boucsein W. Psychophysiology in the work place - goals and methods. In Ullsberger, P, (ed) *Psychophysiology of Mental Workload*, 35-41, Bundesanstalt für Arbeitmedizin, Berlin, 1993.
- De Waard D., Hulst van der, M., Hoedemaeker, M. and Brookhuis, K.A. Driver behaviour in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1999,1,67-82.
- Priez A., Petit C., Brigout C., Tarrière C., Collet C., Vernet-Maury E., Dittmar A., Delhomme G.. Electrodermal characterisation of driver's behaviour. *Second European Conference on Engineering and Medicine - Stuttgart - April 25-28, 1993*
- Priez A, Petit C. Drivers Autonomic nervous activity during emergency braking situations. *Psychophysiology*, 1999, 36, S21.
- Vernet-Maury E, Deschaumes-Molinario C, Delhomme G, Dittmar A. Autonomic nervous system activity and mental workload In Ullsberger, P, (ed) *Psychophysiology of Mental Workload*, 42-48, Bundesanstalt für Arbeitmedizin, Berlin, 1993.
- Vernet-Maury E, Robin O , Dittmar A. The Ohmic Perturbation Duration : an original temporal index to quantify electrodermal response. *Behav. Brain Res.* 1995; 67: 103-107.
- Verwey, W.B. and Veltman, J.A. (1995). Measuring workload peaks while driving. A comparison of nine common workload assessment techniques (Report TM- 1995-B4). Soesterberg, The Netherlands : TNO Human Factors Research Institute.

VIII-3- Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving



Physiological and behavioural changes associated to the management of secondary tasks while driving

C. Collet^{a,*}, A. Clarion^{a,b}, M. Morel^a, A. Chapon^c, C. Petit^b

^aUMR 6082 Université Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex, France

^bUMR 6082 Université Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex, France

^cUMR 6082 Université Lyon 1, 69622 Villeurbanne Cedex, France

^dNational Institute of Research on Transportation and Safety (IRSTEA), 21 Avenue Pauline Mitterrand, 33024, 33075 Bordeaux Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 December 2009
Accepted 21 January 2010

Keywords:
Electrodermal activity
Heart rate
Reaction time
Anxiety
Strain
Dual-task
Shared attention

ABSTRACT

Sharing attention between two tasks requiring the same mental resources is supposed to increase the resulting strain. Distraction while driving may elicit cognitive interference between driving operations and conversation and consequently, may affect driving efficiency. The real scene cues may thus be perceived late or even omitted, increasing the probability to be involved in a critical situation. The aim of the experiment was to study how the additional strain elicited by a secondary task may change drivers' arousal with potential consequences on driving performance. Electrodermal activity, heart rate and reaction time (RT) were the dependent variables. Listening to the radio, holding an in-vehicle or a cell-phone conversation were the secondary communication tasks, performed by 10 participants during a driving sequence on a private street. Within nominal driving, each communication task was requested at random to prevent any habituation or anticipation. The cell-phone conversation made RT increase by about 20%, by comparison to the nominal driving condition. Nevertheless, the in-vehicle conversation impacted RT almost in the same proportion. Physiological data showed that arousal level increased as a function of dual-task requirements, the in-vehicle conversation eliciting the same strain as the remote conversation. With caution due to contextual differences between these two communication tasks, conversing with a passenger was thus as detrimental as using a cell phone.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The aim of this study was to evaluate the strain undergone by drivers when they managed another task while driving, e.g. holding a cell-phone conversation, a conversation with a passenger or listening to the radio. The impact of cell-phone use on driving performance has been widely studied for almost two decades, particularly with an inflation of publications over the past five years (see Card et al., 2008 for review). Hand-held phone was forbidden in most countries in Europe because of motor interference with driving commands whereas the use of hands-free kits remained tolerated. Despite a suspicion of being detrimental, the question of the cognitive interference between phoning and driving has not received a definitive response yet. The question of whether a conversation with a passenger could elicit the same interference as the same conversation through a mobile phone should also be asked. As far as this question was considered, recent publications have brought conflicting results. Cristofari et al. (2007) as well as

Laberge et al. (2004) found little difference between the interference generated by the conversation with a passenger and that elicited by a cellular phone. For example, reaction time (RT) in braking was slowed down by either conversing with a passenger or through a cell-phone. Amado and Ulpiana (2005) compared dual-task conditions using reaction time, attention and peripheral detection situations as dependent variables. None of them differentiated the conversation with a passenger from that through a cellular phone. Verbal interactions thus degraded situation awareness for driving-related information to the same extent during in-person than during remote interactions. However, Gugerty et al. (2004) reported that conversation was performed at an overall slower rate during remote than during in-person interactions, suggesting that the first interaction is more difficult to manage. Finally, Horney and Wickens (2006) concluded that talking on a phone was as detrimental as talking with passengers.

However, many papers also underlined how conversing on a cell-phone differs from conversing with a passenger. Huxson and Rose (2005) indicated that cell-phone conversations consume more attention and interfere more with driving than passenger conversations while Drews et al. (2004) found the highest driving errors

* Corresponding author. Tel.: +33 472 433 242; fax: +33 472 433 846.
E-mail address: ccollet@univ-lyon1.fr (C. Collet).

under the cell-phone condition as compared to the passenger conversation condition. According to Strayer and Drews (2007), drivers are better able to synchronize the processing demands of driving with in-vehicle conversation than with cell-phone conversation. Consequently, in-vehicle conversation does not interfere with driving as much as cell-phone conversation does. Cotygnis et al. (2003) also indicated that in real-world driving, there are often strong differences between conversing with a passenger and conversing with someone via a cellular phone. Conversations with passengers are typically self-paced, in that they may be suspended or adapted at any moment when driving demands require increased attention. The degree to which a driver is distracted by the conversation with a passenger may be to some extent offset by the added capacity for roadway observation offered by the passenger. Consequently, a paired conversation on a cellular phone would be expected to result in higher cognitive demand experienced by the driver, than that elicited by conversation with a passenger, as also hypothesized by Houton and Rose (2005).

To test this hypothesis, researchers have often selected dependent variables related to drivers' behaviour as the conversation was supposed to impair driving performance (reaction time, vehicle speed, headway or lateral deviation – Beeler and Kals, 2006). However, little is known about drivers' functional state associated with dual-task performance e.g. driving plus communication. The experiment by Haighey et al. (2006) revealed that heart rate exhibited the highest values during call periods ($+5.66$ bpm deviation from baseline heart rate). Chapon (2004) found that higher strain was associated with phone conversation, longer reaction time to visual stimuli and higher rate of non-detection being obtained. In addition, this was worsened when the conversation content was hard to follow. Under this condition, the N2-P3 amplitude (two waves extracted from the EEG signal) was lower and heart rate was higher although the difference between the control and the easy conversation condition did not reach significance. If the deleterious effects of conversation, either in-vehicle or by cell-phone may be evidenced in terms of behaviour efficiency, it is not clear whether this is associated with higher strain elicited by increased arousal. As the effects of such cognitive interference remain rather unclear, the aim of this study is to compare driving performance as well as the strain elicited as a consequence of in-vehicle versus remote conversation.

2. Material and methods

2.1. Participants

The participants were 10 licensed drivers aged from 23 to 51 years (mean 35, SD 8.3). They were healthy, not receiving medication and were paid for their participation. Each of them had normal vision or normal to corrected vision. All were also right-handed, allowing the placement of physiological sensors on the left non-dominant hand and making the actions on gears possible without eliciting artifacts. They gave their informed consent after having been informed about the main contents of the experiment but not about the objectives.

2.2. Driving and communication tasks

The experiment took place on a private track which was simultaneously used for other experiments. We used the external part of the circuit, made of several straight lines and curves without stop and restart, so that the ride resembled a rural course. The drivers had nevertheless to manage the traffic as if they had to drive in the field. The driving task was loaded enough to make the drivers allocating mental resources to mental operations and motor actions

during all the session. Drivers' safety was ensured by a professional driver who sat near the participant during the experiment and secured all driving sessions. Thus, the management of the dual-task was made under driving conditions, close to the field. The independent variables were the media of communication and 3 tasks were selected: listening to the radio, talking with a passenger and holding a hands-free phone conversation. Each communication task was performed during the driving session at random. The duration was 2 minutes each. The radio task requested the participants to listen to a pre-programmed broadcast which was selected by the experimenter because of its content, information was delivered and should be memorized by the driver who were told that some questions will be asked after the driving session. The performance to this retention test was not considered but guaranteed that drivers really shared their attention on both driving and radio. The conversation task was made of several questions, prepared with the aim to have continuous dialogue. Thus, the questions were simple, based on day-to-day activities to prevent the drivers to think hard before responding. The same categories of questions were asked during both the in-vehicle and the remote conversation to prevent any difference between the two sessions. If the cell-phone condition started first, for example, the same content will go on as early as the in-vehicle conversation was programmed. The in-vehicle conversation was conducted by the experimenter who sat on the passenger seat. The cell-phone condition was conducted after another experiment called the driver from outside the vehicle. A hands-free kit was used so that the participants did not handle the phone. The call was picked by the experimenter who also rang off so that drivers would only have to speak. Drivers also had to comply with a reaction time task which required responding to orange lights (placed on the upper side of the dashboard) as quickly as possible by a foot-lift from the accelerator pedal. The lights were switched on by the experimenter in a way that the exact time at which the lights were switched on could not be predicted by the driver. Stimuli were triggered while the participants performed both driving and one of the three additional communication tasks. RTs were thus obtained under such experimental condition and were considered the first dependent variable. The control conditions were performed without driving, the participant nevertheless seated behind the driving wheel under the conditions described below with each communication task completed, however without driving. In addition, two conditions with no communication were also included in the experimental design and were "nominal driving" and "driving + RT task". During the experiment, the participants were asked to drive as usual, with respect to the general rules of the Highway Code and to specific instructions which may be given by specific road signs on the circuit.

2.3. Physiological recordings

Physiological parameters were related to the Autonomic Nervous System (ANS) functioning and were recorded as soon as the electrodermal and cardiac sensors were placed. Electrodermal activity (EDA) and instantaneous Heart Rate (HR) were the other two dependent variables. The ANS is known to give a close estimation of subjects' arousal especially through the orthosympathetic branch (Boucsein, 1992) specialized in mobilizing energy resources in response to internal and external milieu demands (Wallin and Hagius, 1986). The eccrine sweat glands system is innervated by sympathetic endings only and is sensitive to psychologically significant stimuli resulting in variations of electrodermal activity. When recordings are done by using the constant current method, skin resistance and skin conductance are the two ways to express electrodermal variations. These are the same, as

the first is the inverse function of the latter. However, more differentiation is provided when data are expressed through skin conductance when the experimental conditions are likely to elicit a high level of strain (just as in a critical situation of driving, for example – see Collet et al., 2005). Conversely, skin resistance should be preferred when the experimental conditions induce a low level of strain. The present experiment did not belong to the category of high strain situations as it was based upon nominal driving conditions. Electrodermal data were thus expressed through skin resistance. Skin resistance was measured with 15 μA DC and recorded using 30 mm² unipolarizable Ag/AgCl electrodes (Clark Electromedical Instruments, Edenbridge, UK – see Fig. 1). Sensors were held by adhesive tape. According to traditional recommendations (Fowles et al., 1981), sensors were placed on the third phalanx of the index and third digit of the non-dominant hand to prevent sensors contacting the driving wheel which would have elicited artifacts.

Heart rate is one of the most used indices as it is closely correlated to mental effort and the arousal attached to it (Mulder, 1992; Brookings et al., 1996). As there is a clear relationship between arousal and the strain the participants felt, it was thus expected to evaluate drivers' functional state during the experimental driving sequences. Three silver electrodes were used in the precordial position to measure the ECG. The time of occurrence of the R-waves could thus be determined. The RR derivation signal (the interval between 2 consecutive R-waves of the ECG) was processed electronically and delivered in the form of instantaneous heart rate. The smallest appreciable variation was 0.5 of a beat per minute and the calibrated scale ranged from 0 to 200 beats per minute. The instantaneous heart rate signal was directly extracted from the electrocardiogram signal at sensor level. Therefore, the instantaneous heart rate was an analog signal. Data acquisition was carried out at 10 Hz on this analog signal. By this method, heart rate increase or decrease could be easily detected and quantified as a reliable indicator of strain (Luczak and Gobel, 2000). Any increase in task demands was thus correlated with an increase in HR (Hancock et al., 2003).

2.4. Data analysis

Physiological data were recorded as early as the participants sat in the vehicle quietly to provide reliable baseline values. Electrodermal and heart rate data were averaged during each experimental 2-minutes-session to be compared one to another. First, a univariate repeated measures analysis was performed to test all

conditions. However, individual baseline levels are known to differ from one participant to another: the scale of Skin Resistance baseline values recorded evolved from 25 to 150 k Ω in the present experiment. As electrodermal activity shows high inter-subject



Fig. 1. Electrodermal sensors positioning on the non-dominant hand and cardiac sensors positioning on the chest. Turning the driving wheel and changing gears required possible without changing electrodermal activity recording.

variability, data were standardized before being processed. Electrodermal values of each driver were averaged for each experimental condition and then divided by a mean reference value recorded during the control period preceding driving. This resulted in a ratio. As skin resistance decreases as soon as drivers started driving, this ratio was less than 1. By using standardized values, greater differentiation between experimental conditions may be achieved and thus, more meaningful information can be obtained (Avery et al., 2004; Collet et al., 2005, 2009).

Comparison of all driving sessions was made with standard post-hoc tests (paired t-tests with Bonferroni correction to prevent any unexpected effect due to multiple 2 by 2 comparisons).

3. Results

First, the behavioural variable will be considered. Reaction time varied as a function of the type of communication. The univariate repeated measures F-test showed that $F(3,27) = 25.8, p < .0001$ (Fig. 2). The post-hoc tests (with Bonferroni corrected p-value) showed differences among several conditions: RT varied from the nominal driving condition (352 ms \pm 56) to the driving + phoning condition (427 ms \pm 53): $t = -5.08, p = .004$ and between the driving + radio (340 ms \pm 51) and the driving + phoning (427 ms \pm 53): $t = 6.37, p = .001$. No difference emerged between the nominal driving (352 ms \pm 56) and the driving + radio conditions (340 ms \pm 51): $t = 1.50, NS$, as well as between the driving + talking with the passenger (405 ms \pm 46) and the driving + phoning conditions (427 ms \pm 53): $t = 2.3, NS$. Taken as a whole, two groups may be distinguished: driving only and driving + radio on the one hand, driving + talking and driving + phoning on the other.

As far as physiological variables are considered, heart rate data were scored as mean values according to each communication condition. The univariate repeated measures F-test showed that $F(3,27) = 54.3, p < .001$ (Fig. 3). The post-hoc tests (with Bonferroni corrected p-value) showed differences among several conditions: the control condition was differentiated from all communication conditions. During nominal driving, mean HR was 77.46 bpm (\pm 3.5) and increased as a function of the additional task demand: 86.91 bpm (\pm 3.3) during the radio listening condition, 82.72 bpm (\pm 3.5) during the conversation with the passenger and 81.75 bpm (\pm 2.3) during the phone conversation ($p < .001$ all). Conversely, no difference emerged between the two conversation tasks ($p = .22, NS$).

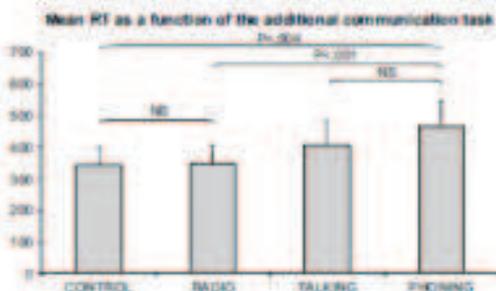


Fig. 2. Reaction time to visual stimuli. The time needed to answer the first item from the 4-alternative panel increased as a function of task complexity. The highest RT was recorded when the drivers had to hold a phone conversation while driving. The difference effect of the dual-task was also observed during in-vehicle conversation as no significant difference emerged between the two types of conversation.

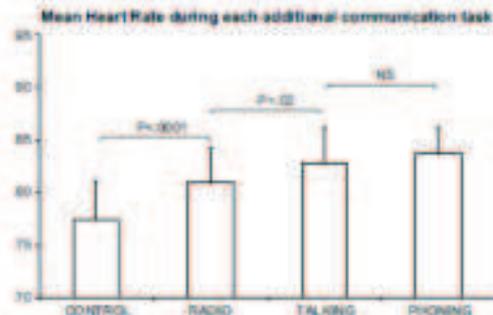


Fig. 3. Mean heart rate values as a function of each dual-task condition. A significant difference was obtained between the control condition (nominal driving) and the 3 remaining situations involving a dual-task. The important point is that no significant difference was obtained between the in-vehicle and the remote conversational conditions.

In a second step, standardized electrodermal activity was processed as a function of both the driving and the communication tasks. Both the communication tasks (control, radio, conversation and phone) as well as the driving conditions (control, driving, and driving + RT) were considered. The between subjects effect compared the driving conditions. The test for this effect showed that: $F(2,27) = 6.45, p = .006$. The standardized EDA value was 0.94 (0.09) under the control condition (i.e. no driving, participants sitting at the driving wheel while remaining motionless). As early as drivers started, the EDA decreased and consequently, we obtained standardized values less than 1. During nominal driving, EDA was 0.82 (0.10) and 0.78 (0.14) during the driving + RT situation. Thus, while remaining motionless in the vehicle (baseline value recoding), standardized EDA was significantly higher than that of the two driving conditions (driving only and driving + RT tasks).

The within subjects effect was tested by the univariate repeated measures F -test: $F(3,81) = 7.46, p < .001$. Standardized EDA of each control condition was also higher from that of each the dual-tasks. The radio listening task, the conversation with the passenger, and the phone tasks elicited lower EDA values than that recorded during the control condition: $t = -4.23, p = .001$; $t = -3.10, p = .01$ and $t = -6.11, p < .001$, respectively. However, no difference emerged between the conversation and the phone conditions: $t = 0.03, NS$, nor between the radio and the conversation conditions: $t = -0.31, NS$. Results are summarized in Table 1 and two-by-two comparisons in Table 2.

4. Discussion

Several distracters may divert drivers' attention from the road scene such as drinking, smoking, eating, listening to the radio or conversing with a passenger (Fox, 2001). Among them, phoning is

Table 1

Mean standardized electrodermal values as a function of the driving conditions and the communication tasks. EDA decreased while the driving conditions evolved from nominal driving to nominal + RT task. In the same way, EDA decreased while the resulting task elicited by the dual-task increased.

	Control	Radio	Conversation	Phone
Control	1	0.82 (0.10)	0.78 (0.14)	0.80 (0.10)
Driving	0.843 (0.08)	0.847 (0.09)	0.816 (0.09)	0.805 (0.10)
Driving + RT	0.807 (0.14)	0.796 (0.10)	0.779 (0.14)	0.770 (0.14)

Table 2

Two-by-two comparisons among dual-task conditions. The major point is that no significant difference was observed when the in-vehicle conversational condition was compared with the cell-phone conversation thus attesting that the two conditions were performed at the same arousal level.

Electrodermal activity	Control	Radio	Conversation	Phone
Control	1	$t = -4.23, p = .001$	$t = -3.10, p = .01$	$t = -6.11, p < .001$
Radio		1	$t = -0.31, NS$	$t = -4.47, p = .001$
Conversation			1	$t = 0.13, NS$
Phone				1

one of several possible activities to be carried out simultaneously with real information processing. The distractive power of phoning while driving has been suspected for many years and using a hands-free phone has not solved the problem as cognitive interference remained. The extent to which this cognitive interference could modify drivers' functional state had not been studied yet. The aim of this experiment was to compare drivers' arousal elicited from several communication tasks.

First, no difference emerged between the control condition and the listening to the radio condition. Even if the experimental instruction was to memorize information attached to radio listening, this additional load was not sufficient to make reaction time increase. This probably required the drivers to allocate more mental resources to process radio information with increased mental effort. However, as drivers have a strong experience of driving, they have automated driving operations and were able to manage their two tasks simultaneously without decreasing performance in one of them or both.

The phone task elicited a significant increase in RT (by more than 20%) and confirmed previous results (Horrey and Wickens, 2006; Carol et al., 2008). Thus, managing two complex tasks simultaneously increased the duration of processing information from the environment and the organism itself. This may affect safety as information from the road scene may sometimes need to be processed immediately, the central nervous system having to associate sensory cues to appropriate motor responses. However, despite a slight disparity in RT values, no significant difference was identified between talking with a passenger and phoning, as early shown by Gagery et al. (2004). Our results are also close to those by Amadio and Ulpinae (2005) who compared conversation with a remote person (hands-free phone) and in-vehicle person (passenger). The effect on measures of attention and peripheral detection tasks was studied. If conversation resulted in slower reactions and fewer correct responses on both tasks, the conversation type (remote vs in-person) did not make any significant difference. While conversing, Treffner and Barlett (2004) evidenced that critical control actions related to braking (one of the potential actions after leaving the foot from the accelerator pedal, the action we tested in the present experiment) were postponed. We thus confirmed that RT to external signal was not different when the conversation with a passenger condition was compared to the cell-phone condition. However, in real-world driving, strong differences may be emphasized between conversing with a passenger and conversing with someone via a cellular phone (Castiglione et al., 2003). Conversations with passengers are typically self-paced, in that they may be suspended or adapted at any moment when driving demands require increased attention. Conversely, if phone conversations are also typically paced, there is a greater expectation of continuous exchange from the individual engaged in the conversation, regardless of driving demands. Unlike when talking with a passenger, the interlocutor cannot share roadway situations and cannot stop conversation when the situation requires the

driver's complete attention. Consequently, paced conversations on a cellular phone would be expected to result in higher cognitive demand experienced by the driver, than that elicited by conversation with a passenger. This may be studied with reference to information brought by physiological recordings. Evaluating the resulting strain elicited by each secondary task performed while driving was the second main objective of this experiment.

Both electrodermal and heart rate data have provided evidence of different levels of arousal according to specific requirements of each experimental condition. The control condition elicited the lowest arousal, as expected. The lowest values of standardized EDA associated with the highest values of heart rate gave evidence that phoning while driving was the most loaded situation. Both physiological data are reliable indicators of the amount of strain undergone (Gallard, 1993; Gallard and Kramer, 2000; Collet et al., 2005, 2010). Each condition should nevertheless be analyzed in greater detail.

As revealed when the control condition and the in-vehicle or radio condition were compared, no difference was observed between RT. However, both EDA and heart rate showed that the dual-task condition was more loaded than control: lower standardized EDA and higher heart rate values were recorded. From this result, we may conclude that a dual-task may require allocating more mental resources than a single task but also that the two tasks may be performed with the same efficiency. In the present experiment, RT did not increase while the secondary task was performed during driving. We obtained quite different results when comparing the two conversation conditions: according to Consiglio et al. (2005), the cognitive demand should be higher during a conversation on a cell-phone than when talking with a passenger. No difference emerged from RT comparison or from standardized EDA and heart rate. The conversation with a passenger or through a mobile phone thus required to mobilize the same resources. Based on RT data, both altered driving performance in the same proportion while eliciting about the same increase in arousal level (0.006 vs 0.005 for standardized EDA, 0.27 vs 0.17 for HR under the driving+conversation and the driving+phoning condition, respectively). Thus, the same increase in mental demand was accompanied by the same response in drivers' arousal. The mental resources required to perform two tasks simultaneously were reflected by changes in the sympathetic branch of the autonomic nervous system activity and were thus intimately linked to variations in EDA and HR.

Despite the similar strain the in-vehicle and remote conversations elicited, the pace of these verbal interactions probably differed due to the difference in the environmental context. This suggests that remote verbal interactions remain more difficult for drivers and should probably be refused to maintain safety. If phone conversations are typically paced, there is a greater expectation of continuous exchange from the individual engaged in the conversation, regardless of driving demands (Consiglio et al., 2005). Unlike when talking with a passenger, roadway situations cannot be shared by the interlocutor and conversation cannot be stopped when the situation requires the driver's complete attention. According to Strayer and Drews (2007), a conversation on the phone cannot be successfully broken into arbitrary units, but instead is composed of "turns" that engage the central processing bottleneck for prolonged periods of time (e.g. pausing in mid-sentence though impedes the flow of the conversation); moreover, this turn-taking is often asynchronous with the upcoming demands of driving. This process should be better studied in future experiments to be well understood.

To conclude, phoning with a hands-free phone while driving can be compared to other "well accepted" secondary tasks like holding a conversation with a passenger. Thus, the way in which cell-phone

conversation is different from in-vehicle conversation depends upon the dependent variables which are measured. In particular, the factor which should now be integrated into experimental paradigms is the conversation content. Briem and Hedman (1995) reported that simple conversation did not adversely affect the ability to maintain road position. On the other hand, Sinar et al. (2005) showed that reasoning tasks disrupt simulated driving performance to a greater extent. The same conclusion was drawn by Haigney et al. (2000) who observed a significant increase of the cognitive demand experienced by drivers with consequent induction in safety margin. However, experimental results also suggested that participants engaged in a process of risk compensation, with driving speed being slower at times of mobile phone conversation. These experiments suggest that the results we obtained should be generalized with caution because the experimental conclusions from each research study are obtained under context-specific conditions.

References

- Arnold, S., Hajjoui, F., 2005. The effects of conversation on attention and peripheral detection: is talking with a passenger and talking on the cell phone different? *Acc. Anal. Prev.* 39, 207–208.
- Auer, F., Joller, U., Strauß, S., Arlt, S., Vossen-Hilgert, E., 2004. Mental workload in air traffic control – an index constructed from field data. *Aviat. Space Environ. Med.* 75, 1–5.
- Banks, J.L., 2005. The impact of conversation: the impact of cell phones on road and driving performance. *Acc. Anal. Prev.* 39, 413–420.
- Boucsein, W., 1991. Psychophysiology in the work place – goals and methods. In: Utterberg, P. (Ed.), *Psychophysiology of Mental Workload*. Amsterdam: Elsevier, pp. 33–42.
- Briem, V., Hedman, L.E., 1995. Behavioral effects of mobile telephone use during simulated driving. *Ergonomics* 38, 2536–2542.
- Brookings, J.D., Wilson, G.J., Isaac, C.R., 1996. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Int. Psychol.* 42, 161–171.
- Card, J.E., Williams, C.R., Isaac, E., Scialfa, C., 2008. A meta-analysis of the effects of cell phones on driver performance. *Acc. Anal. Prev.* 42, 1261–1269.
- Chapuis, A., 2004. Consequences of Using New Information and Communication Technologies During Driving: National Research Institute on Transportation and Safety Report 0401, pp. 31–53.
- Collet, C., Poir, C., Poir, A., Dittmar, A., 2005. Arousal color-word test, autonomic electrodermal activity and performance in a critical driving situation. *Int. Psychol.* 50, 199–203.
- Collet, C., Auer, F., Dittmar, A., 2008. Attention network system and subjective ratings of workload in air traffic control. *Acc. Anal. Prev.* 42, 23–32.
- Coniglio, W., Driscoll, F., Wynn, M., Berg, W.C., 2007. Effect of cellular telephone conversations and other potential interference on reaction time in a tracking response. *Acc. Anal. Prev.* 41, 497–500.
- Drews, F.A., Fossella, M., Strayer, D.L., 2004. Passenger and cell phone conversations in simulated driving: the breakdown of the hazard factor. *Acc. Anal. Prev.* 38, 416–422.
- Ha, J., 2003. *Sony, No Answer: Cell Phones Locked to Accident, Car Interlocks, Car Other Distractions*. The Detroit Free Press, Detroit.
- Hawkes, G.L., Christie, M.J., Goldberg, B., 1993. Performance decrements due to electrodermal measurements. *Psychophysiology* 20, 213–230.
- Gelbert, K.W.C., 1983. Comparing the concepts of mental load and stress. *Ergonomics* 26, 981–1005.
- Gillies, A.W.C., Kramer, A.Y., 2001. Theoretical and methodological issues in psychophysiological research. In: Baskin, E.W., Boucsein, W. (Eds.), *Engineering Psychophysiology: Issues and Applications*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, pp. 31–50.
- Goggin, I., Sakaluk, M., Strubbe, J., 2004. Effects of stress and in-person verbal interaction on verbal fluency rates and attention to dynamic spatial scenes. *Acc. Anal. Prev.* 38, 1020–1023.
- Haigney, D.E., Taylor, R.L., Westerman, S.J., 2000. Cognitive mobile cellular phone use and driving performance: task demand characteristics and compensatory processes. *Trans. Res. Part F* 3, 113–125.
- Hancock, P.A., Truch, M., Simmons, L., 2003. The distraction effects of phone use during a visual driving task. *Acc. Anal. Prev.* 37, 507–514.
- Hwang, W.J., Wickens, C.D., 2006. Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Trans. Res. Part F* 9, 194–205.
- Hunter, J., Ross, J.M., 2005. Cellular telephony and driving performance: the effects of attentional demands on motor vehicle crash risk. *Acc. Anal. Prev.* 39, 825–830.
- Larberg, J., Scialfa, C., White, C., Card, J.E., 2004. The effect of passenger and cellular phone conversations on driver behaviour. *Trans. Res. Part F* 7, 109–119.
- Lisack, V., Giloi, M., 2005. Signal processing and analysis in application. In: Baskin, E.W., Boucsein, W. (Eds.), *Engineering Psychophysiology: Issues and*

- Applications. Lawrence: Elsevier Associates, Methods, 5], pp. 35–110 (Chapter 4).
- Muller, L.J., 1982. Measurement and analysis methods of heart rate and respiration for use in applied ergonometics. *Sci. Psychol.* 34, 205–218.
- Shinar, D., Tractinsky, N., Compton, R., 2003. Effects of workload, age, and task demands on performance from a placebo task while driving. *Acc. Anal. Prev.* 31, 315–320.
- Wagner, G.J., Dewey, F.A., 2007. Cell-phone-induced driver distraction. *Curr. Opin. Psychol.* 16, 126–131.
- Treffner, P.J., Barrett, R., 2004. Hand-eye muscle glucose speech while driving: Angular coordination and control. *Trans. Am. F. T.* 229–245.
- Wolfe, E.L., Nagel, J., 1985. The sympathetic nervous system in man: aspects derived from microelectrode recordings. *Trends Neurosci.* 8, 63–67.

VIII-4- An integrate device to evaluate a driver's functional state

Behavior Research Methods
2009, 41 (3), 882-888
doi:10.3758/BRM.41.3.882

An integrated device to evaluate a driver's functional state

ANTOINE CLARION

*Renault, Guyancourt, France
and CRIS, Claude Bernard University Lyon 1, Villeurbanne, France*

CAROLINA RAMON

INSA de Lyon, Villeurbanne, France

CLAIRE PETIT

Renault, Guyancourt, France

ANDRÉ DITTMAR

INSA de Lyon, Villeurbanne, France

J. P. BOURGEAY

By-Consulting Society, St. Genis Laval, France

AYMERIC GUILLOT

CRIS, Claude Bernard University Lyon 1, Villeurbanne, France

CLAUDINE GEHN AND ERIC McADAMS

INSA de Lyon, Villeurbanne, France

AND

CHRISTIAN COLLET

CRIS, Claude Bernard University Lyon 1, Villeurbanne, France

In the field of cognitive ergonomics, research on car drivers requires multimodal in-vehicle systems for recording not only driving-related behavior, but also contextual information from their surroundings. In addition, reliable information concerning a driver's functional state should be obtained. In this article, we describe an integrated device simultaneously recording specific physiological data, video recordings of the driver and environment, parameters from the vehicle, and contextual data. Physiological signals from the autonomic nervous system provide objective and quantitative information on the driver's alertness and his/her ability to process specific driving-related stimuli or other nonspecific information. Consequently, recorded physiological responses can be related to individual driving events. Electrodermal and cardiac activities are sensitive to time-dependent variations in arousal level and to certain external stimuli, so there is great interest in studying drivers' behavior via measured physiological signals that have been established as suitable behavioral indicators. The present integrated device is capable of processing the relevant indices from raw measured data in real time.

Studies of cognitive ergonomics often place the subjects in complex environments that require the recording of data from both the subject and the environment. In the present case, during in-vehicle studies, objective data related to a driver's behavior are recorded from his/her body (i.e., physiological data) and/or from the vehicle. Additional information may also be gathered from the driver's/vehicle's surroundings using, for example, video recordings and/or other data or events picked up by experimenters. All this information needs to be coded and related to precise

driving-related actions. Such multimodal recordings necessitate the use of a range of different acquisition systems, which must therefore be linked and synchronized; there is, therefore, a need to develop a dedicated, in-vehicle device for synchronized data acquisition from a range of different sources. The resulting multimodal system will be a valuable tool in the assessment of the complex relationships existing between the driver and his environment.

Among several autonomic nervous system (ANS) variables, electrodermal and cardiac activities are known to

C. Collet, christian.collet@univ-lyon1.fr

give the most reliable information on drivers' functional state while driving. The sympathetic nervous system is a highly differentiated, rapidly activated system, with subdivisions specialized in regulating the response of different organ functions to any change in demands resulting from the external and/or internal milieu (Wallin & Fagius, 1986). Because electrodermal activity (EDA) is under the control of the sympathetic branch only, it can be closely correlated to the arousal state. An electrodermal response (EDR) is a short transient fluctuation in the basic tonic EDA level (Boucsein, 1992); several types of stimulus can elicit such phasic activity (Barry & Sokolov, 1993; Turpin, Schaefer, & Boucsein, 1999). The EDA reflects resource allocation in response to mental demands and is correlated with the affective content of the stimulus. The EDR amplitude is affected by the emotional significance of the given stimulus (Dawson, Schell, & Filion, 2007; Maltzman & Langdon, 1982), and thus by the strain the subject associates with it (i.e., the subjective load resulting from the perceived difficulty). Although previously used as a dependent variable in studying orienting response, EDA is considered a reliable measure for studying psychological states such as arousal (Barry, 2004; Dawson et al., 2007), strain (Collet, Petit, Priez, & Dittmar, 2005), influence of personality traits on information processing (Naveteur, Buisine, & Gruzelier, 2005; Schwerdtfeger, 2006), or social interactions (Bugental et al., 1993; Page & Robson, 2007). Heart rate is under the control of both the sympathetic and the parasympathetic branches of the ANS and can furnish additional information to that provided by EDA, particularly when specific data processing is used. One must process the heart-rate signal in such a way as to separate the sympathetic and parasympathetic contributions. Heart-rate variability (HRV) represents the variations of the beat-to-beat alteration. It is computed in either the frequency or time domain and provides information concerning the relative dominance of the sympathetic or the parasympathetic branches. For example, when there is a sympathetic dominance, the HRV spectral density evidences a high level of low-frequency component, whereas a parasympathetic dominance may be deduced when a high level of high-frequency component is observed.

Given the above considerations, there is a strong interest in studying drivers' behavior via their recording physiological signals, thus introducing objective measures that can be clearly associated with mental processes—for example, assessing the resulting load on a subject due to undertaking a second task while driving. Such dual tasking has the potential to (adversely) affect driving performance and the effects of the secondary task should be detected through behavioral and physiological indicators (see, e.g., Engström, Johansson, & Östlund, 2005, or Liu & Lee, 2006, for the use of distractive devices such as in-vehicle information systems or cellular phones). How a driving assistance system can help drivers during tight maneuvers and affect the strain they experience may also be studied using both behavioral and physiological data (Collet, Petit, Champely, & Dittmar, 2003; Nishiyama, Nakazono, Sasaki, & Watanabe, 1996).

Such studies require reliable acquisition devices, but do not, at this stage, require online computations, since the necessary data analysis can be performed following the experiment. It is expected that, eventually, the recorded physiological data can be supplied as an input to an in-vehicle system providing real-time feedback to drivers. Dementienko, Markov, Koreneva, and Shakhnarovich (2001) proposed an electrodermal response-based system to investigate drivers' alertness. In the field of aviation, Haarmann, Schaefer, and Boucsein (2006) used the frequency of nonspecific electrodermal responses to trigger turbulences in an aircraft simulator with the aim of breaking monotony and thus forcing the pilots to remain vigilant. Although these studies relied on a single physiological signal, there is potentially considerable benefit in clustering several physiological signals, since there will be a significant increase in reliability even though there will also be some redundancy. Simultaneously integrating such a set of physiological signals will give a more reliable and robust assessment of drivers' functional states. Healey and Picard (2005) proposed a continuous metric of a driver's stress based on the recording of several physiological signals via electrocardiographic (ECG), electromyographic (EMG), electrodermal, and respiratory recordings (Healey & Picard, 2000). The AUBADE device (Katsis, Ganiatsas, & Fotiadis, 2006) was designed to evaluate emotional states by classifying vectors of features extracted from facial EMG, respiration rate, electrodermal activity, and ECG. The accuracy of the classification of responses into five predefined emotional categories was up to 86% (high stress, low stress, disappointment, euphoria, and neutral). This system was validated under simulated driving conditions, and is intended to monitor drivers operating under extremely stressful conditions, such as during car racing.

The above systems thus provide multiple, in-vehicle physiological recordings on the drivers and perform advanced functional state recognition. They are, however, not designed to integrate and synchronize information from other nonphysiological sources, unlike the system we describe in the present article. For example, parameters recorded from the vehicle may provide relevant information on the driver's action associated with contextual data. Integrating information from many sources should therefore help the experimenter to perform a more accurate analysis. Causal relationships will probably be established between drivers' actions and information from the environment, thus giving a better understanding of how drivers' functional state was impacted. In this way the data source will be expanded, enabling the development of integrated multimodal driving analysis with the associated hard- and software tools. It is expected that the system we describe in the present article will be used in various experimental driving situations and will prove to be a useful applied research tool.

DEVICE DESIGN

Vehicle Parameter Module

Data originating from the vehicle provides indirect but useful information on a driver's intention, expressed

through the driver's general behavior (e.g., vehicle speed, steering wheel angle, use of commands, and pedal pressure). Such actions are closely related to the driver's intention in the given driving context (sudden vehicle speed variation for detecting braking, steering wheel angle, and/or flashing indicators for detecting turns, etc.). Such data are of great interest to experimenters, since they provide quantitative, objective, and continuous information. Along with the increase in in-vehicle electronics, modern cars are now equipped with a controller area network (CAN) bus. The local calculators communicate signals at various sample rates via the CAN bus in order to process information originating from various parts of the vehicle.

The commercial CANalyser software (Vector, GmbH) records data from the CAN bus using a dedicated software pilot, which are then backed up as a CANalyser file. This information is available for further exportation and was exploited in the present experimental setup.

Physiological Data Module

The present device has the ability to record several physiological signals: EDA, ECG, and respiratory frequency (the latter deduced from chest movements). EDA is measured using a 5- μ A DC current applied between two electrodes. The two 50-mm² Ag/AgCl electrodes (E 243, Clarke Electromedical Instruments, Edenbridge, England) are placed with isotonic gel (Teca, ref. 822-201210 or GEL101, Biopac Systems, Inc., Goleta, CA) on the second and third digits' fingertips of the nondominant hand (maximum current density 10 μ A/cm², as per traditional recommendations; Fowles et al., 1981). Since scars may alter the skin's electrical properties, participants with scars were excluded from the experimental group. Fingertips are considered reliable sites to record EDA (Scerbo, Freedman, Raine, Dawson, & Venables, 1992), and these were selected to prevent any contact between the sensors and the vehicle's steering wheel, which would otherwise

have elicited recording artifacts. Scerbo et al. found larger electrodermal response amplitudes at these sites than at traditional medial sites.

The ECG was recorded using three pregelled sensors, with two of them being placed along the cardiac axis, and the remaining sensor placed just under the left clavicle and serving as a reference. The raw ECG signal was amplified ($\times 10$) and analog passband filtered (the 8- to 16-Hz passband included the QRS complex frequencies), then reamplified ($\times 100$). To prevent noise contamination, this data processing was performed close to the signal source. The corresponding electronic material was therefore set up outside the acquisition device, close to the cardiac sensors. The acquisition device also contained the piezoelectric respiration signal transducer. Respiration movements were recorded using an air balloon embedded in a chest belt, pressure variations mirroring chest respiratory movements. The respiration frequency was extracted offline, using a basic smoothing/derivation/peak detection algorithm. This information was then used in the sinus-arrhythmia analysis.

The output cable was shielded and twisted. Analog R-wave peak detection was then performed and the device's microcontroller computed the interbeat intervals prior to saving the instantaneous heart-rate (IHR) signal.

The acquisition device was designed to convert measured analog voltages into relevant digital physical units, sampled at 10 Hz and 16 bits each. A software interface was dedicated to control the device. Physiological data were then stored in comma-separated values (.csv) files. A new file was created and saved every 5 min to prevent unexpected data loss.

Video Module

The video module is necessary to give the experimenter an overview of the driving scene and the driver's actions, although this was not often used for data coding. In addition, inferring gaze direction may be possible in the case of obvious changes (e.g., glancing from the road to the rearview mirrors) but the use of video is not adequate to identify gaze fixation points precisely. If needed, the present device could also integrate an eyetracking system to record gaze behavior. A commercial "quad unit" combines the video fluxes from the four analog cameras. This results in a single 2×2 matrix video flow. A commercial frame grabber (Dazzle DVC 80) digitizes the video signal. The video acquisition software compresses the video digital flow into a DivX format, which is then saved under .avi file format. The video sample frequency can be set at several frequencies (usually 25 or 30 Hz), depending on the desired trade-off between time accuracy and file weight.

Since the timescale from the computer's core is more reliable than that from the video digitizing, a strip with the time code is integrated into each video frame by the video acquisition software. This timescale is considered the genuine temporal index and is read graphically by a subroutine associated with the data analysis software.

Contextual Data Module

Contextual data provide information on events occurring in the subject's environment during the experiment—that is, traffic conditions (a stop sign or a red light, for example), or any unexpected event. Such data could be recorded by the experimenter each time something relevant occurs. A brief description can be associated with each event and the corresponding time. Contextual data have obvious advantages, such as helping the experimenter understand the whole situation and building up links between various pieces of information, as well as in selecting and comparing information on similar events. Finally, the experimenter can mark time boundaries of special interest. This necessitates defining and selecting the corresponding time range within the whole recording time. Thus, important events may serve as references to define time boundaries that will be used in the subsequent physiological data processing. They are therefore essential in providing references when analyzing drivers' behavior. Contextual data acquisition is triggered by the experimenter, who maintains the ability to de-

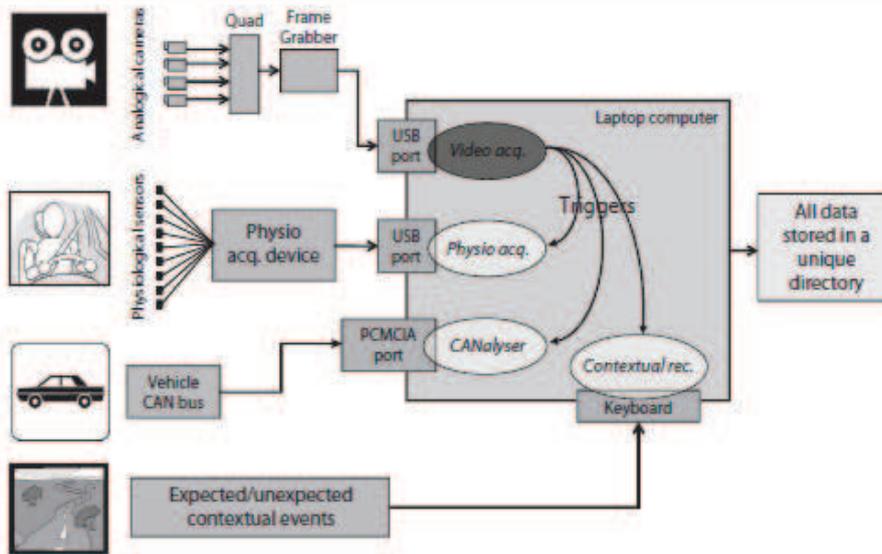


Figure 1. Schematic representation of the data acquisition device. The four data sources are represented on the left (video, physiological, vehicle, and contextual events). Data flows use specific recording systems converging on the main computer, with the same timescale.

cide whether the current situation is worth being marked or not.

In the present device, external events are easily recorded during data acquisition, using customized software. The more probable events may be previously programmed according to the aim of the experiment, and thus pre-labeled in a specific file. An interface displays several labeled buttons corresponding to the pre-labeled events. Unexpected events may nevertheless be added easily at any time during the experiment. Each time a new event is recorded, a new row, including the corresponding label and time code, is appended to a unique text file (.txt). During data analysis, the experimenter can update the file by adding new information or modifying the recorded information, if necessary. Further analysis may then associate cinematic and physiological data with reference to each event and thus provide accurate information related to drivers' behavior.

Data Synchronization

Data originate from four different and independent modules, each being driven by specific software and inputting into the computer through specific ports (see Figure 1). The video acquisition software manages data synchronization by triggering and stopping other recordings, including the physiological signals. During recording, each module maintains its own timescale, the start and stop points being set by the video software. During synchronization tests, the drifts measured between different timescales were less than 0.15 sec/h of recording.

The master software also sends information to the other modules using the directory path. In this way, data from all modules are saved in the same directory.

Data Analysis

Two software programs display two separate windows on the same computer screen for data analysis. The first manages the video data, and the other is dedicated to both physiological and vehicle data processing. Both programs display the current time code and contextual information continuously, as shown in Figure 2. Physiological variations related to contextual events are thus easily observable. When the current time code is manipulated by moving a current time cursor on the data plots or on video, the two displays remain synchronized, each being coupled to the other. A vertical color line is available on the physiological and vehicle parameter plots to determine time boundaries. The time segment needed for further quantitative analysis can be selected and the timescale easily

changed. Graphic functions such as zooming, framing, scaling, and graph sweeping facilitate data exploration and visualization. Defining criteria for the evaluation of functional state changes is the next step in the process but is not described here, since the present article is focused mainly on methodological considerations. Several indicators have already been selected and assessed as criteria for drivers' functional state evaluation; this work has been published elsewhere (Clarion, Ramon, Petit, & Collet, 2008; Leclerc, Petit, Mollard, & Collet, 2008; Ramon et al., 2008).

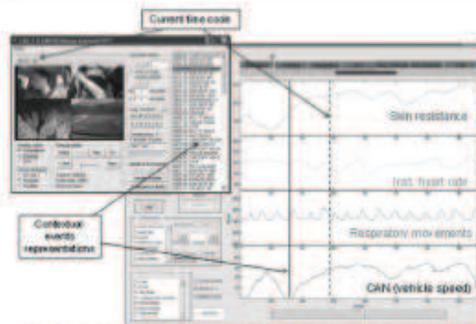


Figure 2. Schematic representation of the two data screens with the same time base. The two programs are linked one to another to display synchronized data. The vertical dashed line indicates the time corresponding to each of the four video screens, and the solid vertical line corresponds to one of the selected event markers. Thus, the experimenter can process physiological data associated with a driver's behavior under a specific driving condition.

Signal Processing and Physiological Indices Extraction

The software provides several semiautomatic tools for data extraction and quantification. These are designed to work around contextual events. Some of them, related to both EDR and heart rate, are presented below.

Variation of tonic EDA level is a reliable indication of a change in overall arousal, whereas phasic events (EDR) are recorded in response to specific stimuli (Boucsein, 1992). Because of the great intersubject variability in EDA values, individual data should be standardized before being processed by statistical computation. There are several methods to standardize EDA values, each being available in the data processing software. The most common method is to take a time window, preferably when the subject is relatively relaxed, and use the mean EDA

value as a reference. Then, each time period of special interest is divided by this reference. The ratio is generally close to 1 and gives information concerning the drivers' levels of relaxation (if below 1 when EDA is expressed in terms of skin conductance) or activation (if above 1 when EDA is expressed in terms of skin conductance); the intersubject variability is thus reduced, and more useful information can be obtained (Collet et al., 2005). Signal features such as mean, standard deviation, and number of EDRs are computed within the selected windows. The EDRs related to the selected contextual events are detected automatically and may then be quantified using several indices—for example, amplitude, duration (Vernet-Maury, Robin, & Dittmar, 1995), half recovery time, slope, and latency.

Heart rate (HR) is a useful indicator of the strain produced in the participant by a particular driving situation. In the case of missed ECG R-waves or false detection due to artifacts, HR can be estimated offline using an algorithm iteratively replacing IHR variations exceeding a 10-bpm threshold with interpolated values. Interpolation computation is performed between pairs of below-threshold values. The new signal, free of artifact, is then resampled prior to power spectral density computation. The HRV spectrum is generally described within three frequency bands (Figure 3A): very low frequencies (VLF; 0.003–0.04 Hz), low frequencies (LF; 0.04–0.12 Hz), and high frequencies (HF; 0.12–0.40 Hz). Normalized relative powers of each frequency band provide information on the involvement of the two ANS subsystems (Berntson, Quigley, & Lozano, 2007; Malliani, 1999). Time domain computations are also performed using the mean successive beat intervals (NN), the interbeat times standard deviation (SDNN), the root mean square successive difference of intervals (RMSSD), and the Poincaré plot representations (Figure 3B). The Poincaré plots display the correlation between consecutive RR intervals within a given time period. They resemble a cloud of points oriented along the

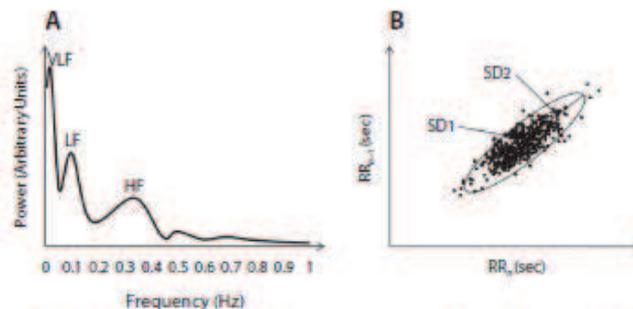


Figure 3. (A) Three main spectral components computed from heart-rate variability: very low frequency (VLF), low frequency (LF), and high frequency (HF). (B) A typical Poincaré plot. The horizontal axis represents the RR interval(s) of a given beat and the vertical axis represents the RR interval(s) of the next beat. The SD1 index gives an estimation of the short diameter of the fitted ellipse and the SD2 index that of the long diameter. This Poincaré plot represents a 300-sec-long data recording.

line of identity (SD2), the dispersion along which provides information on long-term variability, whereas SD1 is perpendicular to the line of identity and provides information on short-term variability (Brennan, Palaniswami, & Kamen, 2001). SD1 mainly reflects parasympathetic activity (Kamen, Krum, & Tonkin, 1996). These indices give specific information on the strain the participant experiences when confronted with a particular driving situation.

The software can be modified to add any new index. The quantitative data are saved in a specific worksheet, prior to data processing and further statistical analysis.

CONCLUSION

The present integrated system was designed for data acquisition from field tests—that is, in-vehicle recordings—and also has onboard data processing tools (e.g., an event marker). During an experiment, useful contextual information can be saved in real time and associated with the relevant behavior and physiological activity. Intersubject analysis, using both behavioral and physiological data, can evidence specific patterns related to drivers' functional state and behavior. Intrasubject analysis using the device will help in understanding how each individual responds to a given driving context, learning and evolving when confronted several times with the same driving situation. Thus, drivers' behavior may be assessed using a range of different indicators, thereby enabling various analyses that improve reliability.

Following validation tests, the presented device has been used in several experiments, covering a wide range of driving environments (simulator, private track, and open road) and driving situations (Clarion et al., 2008; Leclerc et al., 2008; Ramon et al., 2008). The integrated data set has been found to be well designed, providing a better understanding of drivers' behavior, under normal driving (e.g., during monotonous driving conditions, when a hypovigilant state might occur) to critical situations (e.g., requiring managing collision avoidance in a hard-braking situation). Between these two extreme conditions, however, various driving situations involving distraction or dual-task management would benefit from being studied using the present system. The next stage of the research is to implement and test new automatic features for extraction, classification, and pattern recognition. The device will also be further improved by incorporating new electronic components and new sensors, to make it less intrusive and more suitable for ambulatory monitoring.

AUTHOR NOTE

This project has been supported by the French Transportation Ministry and the National Research Agency. Correspondence concerning this article should be addressed to C. Collet, Mental Processes and Performance Laboratory, CRIS, Claude Bernard University Lyon 1, 69622 Villeurbanne, France (e-mail: christian.collet@univ-lyon1.fr).

REFERENCES

- BARRY, R. J. (2004). Stimulus significance effects in habituation of the phasic and tonic orienting reflex. *Integrative Psychological & Behavioral Science*, *39*, 166-179. doi:10.1007/BF02734437
- BARRY, R. J., & SOKOLOV, E. N. (1993). Habituation of phasic and tonic components of the orienting reflex. *International Journal of Psychophysiology*, *15*, 39-42. doi:10.1016/0167-8768(93)90093-5
- BERTSON, G. G., QUIGLEY, K. S., & LOZANO, D. (2007). Cardiovascular psychophysiology. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Bertson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (3rd ed., pp. 182-210). New York: Cambridge University Press.
- BOUCSEIN, W. (1992). *Electrodermal activity*. New York: Plenum.
- BRENNAN, M., PALANISWAMI, M., & KAMEN, P. (2001). Do existing measures of Poincaré plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability? *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *48*, 1342-1347. doi:10.1109/10.959330
- BUGENTAL, D. B., BLUE, J., CORTEZ, V., FLECK, K., KOPEKIN, H., LEWIS, J. C., & LYON, J. (1993). Social cognitions as organizers of autonomic and affective responses to social challenge. *Journal of Personality & Social Psychology*, *64*, 94-103.
- CLARION, A., RAMON, C., PETIT, C., & COLLET, C. (2008, September). Comparing stopping at traffic lights and stop signs using electrodermal activity indicators. In *7th International Conference on Psychophysiology in Ergonomics*, New York.
- COLLET, C., PETIT, C., CHAMPELY, S., & DITTMAR, A. (2003). Assessing workload through physiological measurements in bus drivers using an automated system during docking. *Human Factors*, *45*, 539-548. doi:10.1518/hfes.45.4.539.27082
- COLLET, C., PETIT, C., PRIEZ, A., & DITTMAR, A. (2005). Stroop color-word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation. *Biological Psychology*, *69*, 195-203. doi:10.1016/j.biopsycho.2004.07.003
- DAWSON, M. E., SCHELL, A. M., & FILSON, D. L. (2007). The electrodermal system. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary, & G. G. Bertson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (3rd ed., pp. 159-181). New York: Cambridge University Press.
- DEMENTIENKO, V. V., MARKOV, A. G., KORENEVA, L. G., & SHAKH-MAROVICH, V. M. (2001). Automatic checkout systems to monitor driver's vigilance. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, *29*, 157-171.
- ENGSTROM, J., JOHANSSON, E., & OSTLUND, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behavior*, *8*, 97-120. doi:10.1016/j.trf.2005.04.012
- FOWLES, D. C., CHRISTIE, M. J., EHELBERG, R., GRINGS, W. W., LYKKEIN, D. T., & VENABLES, P. H. (1981). Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, *18*, 232-239. doi:10.1111/j.1469-8986.1981.tb03024.x
- HAARMANN, A., SCHAEFER, F., & BOUCSEIN, W. (2006). Adaptive automation using electrodermal activity during a simulated IFR flight mission. In *Proceedings of the IEA 2006 Congress: Meeting Diversity in Ergonomics*. Amsterdam: Elsevier.
- HEALEY, J. [A.], & PICARD, R. [W.] (2000). SmartCar: Detecting driver stress. In *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition* (pp. 218-221). Washington, DC: IEEE Computer Society. doi:10.1109/ICPR.2000.902898
- HEALEY, J. A., & PICARD, R. W. (2005). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *6*, 156-166.
- KAMEN, P. W., KRUM, H., & TONKIN, A. M. (1996). Poincaré plot of heart rate variability allows quantitative display of parasympathetic nervous activity in humans. *Clinical Science*, *91*, 201-208.
- KATSEB, C. D., GANIATSAS, G., & FOTIADIS, D. I. (2006). An integrated telemedicine platform for the assessment of affective physiological states. *Diagnostic Pathology*, *1*, 16. doi:10.1186/1746-1596-1-16
- LECLERC, F., PETIT, C., MOLLARD, R., & COLLET, C. (2008, January-February). Braking strategies and mental load under simulated and actual driving conditions. In *Proceedings of the 10th Driving Simulation Conference (DISC Europe 2008)*, Monaco.
- LIU, B. S., & LEE, Y. H. (2006). In-vehicle workload assessment: Effects of traffic situations and cellular telephone use. *Journal of Safety Research*, *37*, 99-105. doi:10.1016/j.jsr.2005.10.021
- MALLIANI, A. (1999). The pattern of sympathovagal balance explored in the frequency domain. *News in Physiological Sciences*, *14*, 111-117.
- MALTZMAN, L., & LANGDON, B. (1982). Novelty and significance as determiners of the GSR index of the orienting reflex. *Physiological Psychology*, *10*, 229-234.

- NAVETEUR, J., BUISINE, S., & GRUZELIER, J. H. (2005). The influence of anxiety on electrodermal responses to distractors. *International Journal of Psychophysiology*, *56*, 261-269. doi:10.1016/j.ijpsycho.2004.12.006
- NISHIYAMA, Y., NAKAZONO, T., SASAKI, M., & WATANABE, Y. (1996). Physiological evaluation of effect on driver's mental work load for a newly-developed semi-automatic transmission system. *JSAE Review*, *17*, 395-400.
- PAGE, M., & ROBSON, A. (2007). Galvanic skin responses from asking stressful questions. *British Journal of Nursing*, *16*, 622-627.
- RAMON, C., CLARION, A., PETIT, C., DITTMAR, A., BOURGEAY, J., & COLLET, C. (2008, September). Mental load attached to cruise control use. In *7th International Conference on Psychophysiology in Ergonomics*, New York.
- SCERBO, A. S., FREEDMAN, L. W., RAINE, A., DAWSON, M. E., & VENABLE, P. H. (1992). A major effect of recording site on measurement of electrodermal activity. *Psychophysiology*, *29*, 241-246. doi:10.1111/j.1469-8986.1992.tb01693.x
- SCHWERDTFEGER, A. (2006). Trait anxiety and autonomic indicators of the processing of threatening information: A cued S1-S2 paradigm. *Biological Psychology*, *72*, 59-66. doi:10.1016/j.biopsycho.2005.07.008
- TURPIN, G., SCHAEFER, F., & BOUCSEIN, W. (1999). Effects of stimulus intensity, risetime, and duration on autonomic and behavioral responding: Implications for the differentiation of orienting, startle, and defense responses. *Psychophysiology*, *36*, 453-463.
- VERNET-MAURY, E., ROBIN, O., & DITTMAR, A. (1995). The ohmic perturbation duration, an original temporal index to quantify electrodermal responses. *Behavioural Brain Research*, *67*, 103-107. doi:10.1016/0166-4328(94)00148-9
- WALLIN, B. G., & FAGIUS, J. (1986). The sympathetic nervous system in man: Aspects derived from microelectrode recordings. *Trends in Neurosciences*, *9*, 63-67. doi:10.1016/0166-2236(86)90024-X

(Manuscript received October 30, 2008;
revision accepted for publication May 7, 2009.)

VIII-5 Assessing workload through physiological measurements in bus drivers using an automated system during docking

Assessing Workload through Physiological Measurements in Bus Drivers Using an Automated System during Docking

Christian Collet, Claude Bernard University, Lyon, France, Claire Petit, Renault, Guyancourt, France, Stephane Champely, Claude Bernard University, Lyon, France, and Andre Dittmar, National Institute of Applied Science, Villeurbanne, France

The aim of the experiment was to test the effect of an automated system of bus docking on drivers' mental workload. Reduced workload is thought to be brought about by helping the driver to maneuver, as he or she is required only to monitor proper functioning of the system. However, the true impact of the system on drivers must be studied to guarantee good acceptance and minimal distraction from traffic. Workload was estimated by electrodermal activity recording while drivers tested 5 scenarios involving (or not involving) the docking system. Results showed that docking precision was improved when the system was used. When drivers monitored the functioning of the system, their workload was higher than that observed during manual docking; however, reduced workload was evidenced after a learning process. The docking system was also shown to increase workload in the event of dysfunction, especially when drivers had to take over control. Despite this particular situation, and after habituation, such a system could be integrated into buses to improve safety during boarding and egress.

INTRODUCTION

Traffic systems are undergoing important changes with the advent of intelligent transport systems (ITSs). Safety remains the predominant preoccupation when integrating an ITS into vehicles. Intelligent technologies may potentially improve traffic safety. They may also affect it adversely. Interactions between humans and ITSs (human-machine interaction) should therefore be carefully evaluated. The effect on safety depends on specific advanced technologies and the manner in which these are incorporated into the vehicle. ITSs should be developed as user-centered solutions rather than technology-centered answers (Noy, 1997). Greater efforts must be directed toward understanding and accommodating the human element in road

transportation so that future transportation objectives may be achieved (e.g., reducing vehicle crashes). According to Noy, there is a need to expand the scope of traditional human factors on understanding human interactions with the elements of the system. There is also increasing recognition of the urgent need for systematic procedures and criteria for testing the safety of ITSs prior to large-scale market penetration.

Vehicles are now equipped with a number of warning and safety devices to prevent injury-causing accidents (Nanthavanij, Yenradee, & Techapichetvornich, 1995). Standard safety devices can be divided into two groups: passive systems, which act without any human interaction (e.g., airbags), and active systems, which are supposed to be dependent on human action and/or regulation (e.g., noncontact obstacle sensors). The use of a new intelligent safety feature not only provides an effective warning

Address correspondence to Christian Collet, Claude Bernard University, UFR STAPS, 27/29 Boulevard de 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex, France; christian.collet@univ-lyon1.fr. **HUMAN FACTORS**, Vol. 45, No. 4, Winter 2003, pp. 539-548. Copyright © 2003, Human Factors and Ergonomics Society. All rights reserved.

approach but also helps to control critical situations. For example, braking and steering are required when avoiding an obstacle. The anti-lock braking system keeps the vehicle under the driver's control as the wheels go on turning, even in the event of extreme braking. However, it has been shown that in order for this safety device to be effective, drivers should know how it works (Priez, Petit, Tarrere, Dittmar, & Vernet-Maury, 1992). As action (braking and steering) is associated with the functioning of the safety system, drivers should adapt their activation (physiological arousal) and their vigilance (focusing attention) to the surrounding context – a critical situation involving collision avoidance. With or without safety systems, crashes will be difficult to avoid if drivers' behavior is not carefully adapted.

Of the various roles for ITSs, that of an assistance system during bus docking should be evaluated. Parking aids that are becoming available or are soon to come on the market should be placed in the category of safety systems involving human-machine interaction. They use cameras or infrared techniques and are especially helpful to persons with mobility problems (e.g., to enable them to get onto the bus easily). Such assistance involves several means for longitudinal and lateral control of the bus. Reduced workload is thought to result from using such navigation systems, helping the driver to maneuver by assisting him or her in monitoring the proper functioning of the system (Farber, 2000). However, the true impact of the system on drivers must be studied by demonstrating the particular importance of the specific layout of the human-machine interface, in order to guarantee high acceptance and minimal distraction from traffic.

A tight-maneuver precision dock system positions a bus or commercial vehicle precisely in relation to the curb or loading board. The driver maneuvers the vehicle into the loading or boarding area and then shifts to automation. Sensors continuously determine the lateral distance in relation to the end of the vehicle loading/boarding area. The driver can override the system at any time by braking or steering and is expected to monitor the situation and take emergency action if necessary (e.g., if a pedestrian steps in front of the vehicle). When the vehi-

cle is properly docked, it stops and reverts to manual control. In freight or bus terminals, this service could increase facility throughput as well as safety. Because the system must be monitored, the aim of this paper is to investigate the role of a tight-maneuver precision dock system on bus drivers' mental load.

Assessing mental workload is central to motor vehicle driving studies, whether one is elaborating a cognitive model of the task, creating high-performance tools, or evaluating human-machine interactions. However, despite its ubiquity, workload is hard to pinpoint. It is generally considered to be a multifaceted construct that cannot be studied directly but, rather, must be inferred from different quantifiable variables. Mental load presents two aspects: The first, sometimes called *stress*, is related to the measurable constraints pertaining to the task and its environment. According to Gaillard (1993), mental load and stress are two related concepts that originate from different theoretical frameworks. The second aspect, *strain*, has a more subjective nature and represents the cost for the operator (i.e., the effects of previous constraints on him or her); there is general agreement that strain should be considered as being the actual workload.

Even though workload is not a well-defined concept, three dimensions are thought to have a strong influence on it: a time-based factor, a task-intensity-based factor (such as difficulty or complexity creating demands for attentional resources), and an operator psychological/physiological state factor (for a description of the model, see Hendy, Liao, & Milgram, 1997). Because mental workload is related to mental operations of processing information, it is assumed that nonautomated tasks require allocation of

mental resources (e.g., focused attention) and that workload reflects the overall demand for resources. *Overload* may be defined as an excessive demand on perceptual and cognitive resources (visual and auditory perception, memory, attention, etc.) with respect to general abilities to process information.

Vigilance plays a vital role in maintaining human safety – for example, in environments such as air traffic control and, more commonly, motor vehicle driving. The relationships between the organism and its environment are

finally linked with arousal levels that characterize vigilance levels. Thus arousal variations are illustrated by vigilance variations in behavior. However, arousal is a relatively nonspecific concept, whereas vigilance has a more direct behavioral connotation and involves sustained readiness to detect and respond to environmental changes: It is an active, performance-related process involving perception of stimuli and information processing (Caldwell et al., 1994; Parasuraman, 1983).

The autonomic nervous system (ANS) is known to give an estimation of human arousal, especially through the orthosympathetic branch (Boucsein, 1993; Vernet-Maury, Deschaumes-Molinaro, Delhomme, & Dittmar, 1995). Variations in skin electrical phenomena have long been observed. A rapid increase in skin conductance (i.e., phasic responses) is recorded just after the stimulus. The characteristic perturbation of the curve is a reliable indicator of information-processing duration (Vernet-Maury, Robin, & Dittmar, 1995). Electrodermal responses are dependent on the sympathetic nervous system (Boucsein, 1992). This system is specialized in mobilizing energy resources in response to internal and external milieu demands. Its role is to respond to emergency situations. By continuously recording electrodermal activity during experimental bus docking tasks, we expected to better understand the effects of a tight-maneuver system on drivers' mental load.

METHOD

Participants and Task

The experiment was divided into two sessions involving 7 male bus drivers (mean age = 45.5 years, $SD = 10.5$). The first session took place in a closed private circuit, whereas the second was conducted in the field (open urban route). The participants were told to drive as usual and to stop at each station. A mark was drawn on the ground before each bus stop. Drivers were to place their bus in the marked-out area in order for the bus to be recognized by a camera, which then started up the docking system. By turning the wheel, the system elicited a docking maneuver with such precision that the bus always ended up approximately 10 cm from the curb. At all times, drivers could accelerate or

brake, and their ability to take over control was maintained. As soon as the system located the mark, a green warning light informed drivers that the docking system had started up. A second, tactile signal on the wheel (vibration) informed drivers to leave it free.

Experimental Design

Drivers were to park their bus as precisely as possible in both situations (private circuit and open urban route). Each driver performed 33 experimental dockings. Each docking lasted about 5 min, including the driving time between two docking stations and a short period of rest allocated after each docking operation. As each experimental docking was thought to elicit physiological responses, this rest period was included to allow physiological variables to return to their basal levels. Five different conditions were randomly presented: (a) 4 dockings without the tight-maneuver system (manual mode, MAN); (b) 13 dockings with the tight-maneuver system (nominal mode, NOM); (c) 5 dockings under a "hidden defect" condition (hidden defect, DEF); (d) 6 dockings at speed or position limits (LIM); and (e) 5 dockings with drivers taking over control (CONT).

The experimenters elicited a hidden defect by either leaving the green warning light off or by switching off the camera so that the mark could not be identified and the system not begin to function. In the speed or position limits condition, the experimenters either required

the participants to drive faster than 40 km/h or put an obstacle on the street that forced the drivers to place the bus too far from the curb. In either case, the system could not be engaged. Requiring drivers to take over control could be elicited in two ways: by switching off the tight-maneuver system when it was still working and by having an obstacle suddenly move in front of the bus.

Docking conditions (circuit or in the field) and the five docking scenarios were considered to be the independent variables. The first dependent variable was the precision of docking. To evaluate the parallelism between the bus and the curb, two measurements were carried out between the curb and the bus, when parked: distance of the front of the bus from the curb and of the middle of the bus from the curb. The

second dependent variable was the skin resistance. Skin resistance response duration is expected to evolve simultaneously with workload and thus to be an index of its variation. Among other measures, skin resistance is thus considered to be a witness of workload. It is not workload itself but, rather, an index from which workload and its variation can be inferred.

Physiological Recording

Cutaneous resistance was recorded using 25 mm² unpolarizable Ag/AgCl electrodes (Clark Electromedical Instruments, Edenbridge, UK). According to traditional recommendations (Fowles, Christie, & Edelberg, 1981), sensors were placed on the second phalanx of the index and third digit of the nondominant hand and were held by adhesive tape. Resistance was measured with 15 μ A DC current. A temporal index was defined because response amplitude depends on the prestimulation value (Furedy & Scher, 1989). The time during which the participant "responds" to stimuli without referring to the initial value (or tonic level) defines the ohmic perturbation duration (OPD index; Figure 1) and reveals information processing by participants (Vernet-Maury et al., 1995).

Questionnaire

The participants were asked to rate their opinion using a 7-step scale. The question "Do

you agree with this proposal?" was asked for four statements: "the system provides assistance during docking," "the system is user-friendly," "the system is easy to use," and "the system improves the precision of docking." Strong agreement was rated 3, strong disagreement was rated -3, and a neutral opinion was rated 0. Intermediate opinions could be rated by intermediate levels (i.e., -2, -1, 1, or 2).

RESULTS

Docking precision was estimated in the field, without (MAN) and with the automated system (NOM), by measuring the distance between the front and the middle of the bus and the curb (Figure 2). In the manual mode the mean distance between the front of the bus and the curb was 26.1 cm ($SD = 4.4$ cm), whereas with the automated system this distance was reduced to 21.3 cm ($SD = 1.7$ cm). The Friedman test showed a significant difference in performance, $\chi^2 r = 6.4$, $p = .01$. Under the same conditions, the distance between the middle part of the bus and the curb was 24.1 cm ($SD = 3.8$ cm) and 18.6 cm ($SD = 2.6$ cm), respectively. Again, the Friedman test showed a significant difference in performance: $\chi^2 r = 6.4$, $p = .01$.

Responses to the questionnaire items were as follows: for "the system provides assistance during docking," mean = 2.0 ($SD = 0.82$); for "the

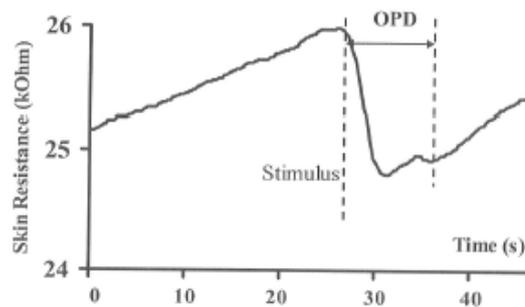


Figure 1. Example of skin resistance recording and ohmic perturbation duration (OPD) index computation. OPD is measured at the very beginning of the sudden fall, which occurs simultaneously with stimulus initiation. It is followed by many fluctuations at a lower resistance level, compared with the tonic level before stimulation. The period ends when recovery shows no fluctuations (i.e., when the slope resembles that observed before stimulation). Thus OPD is defined as the period during which a person is under the effect of stimulation (i.e., the time during which he or she processes the information related to the stimulus).

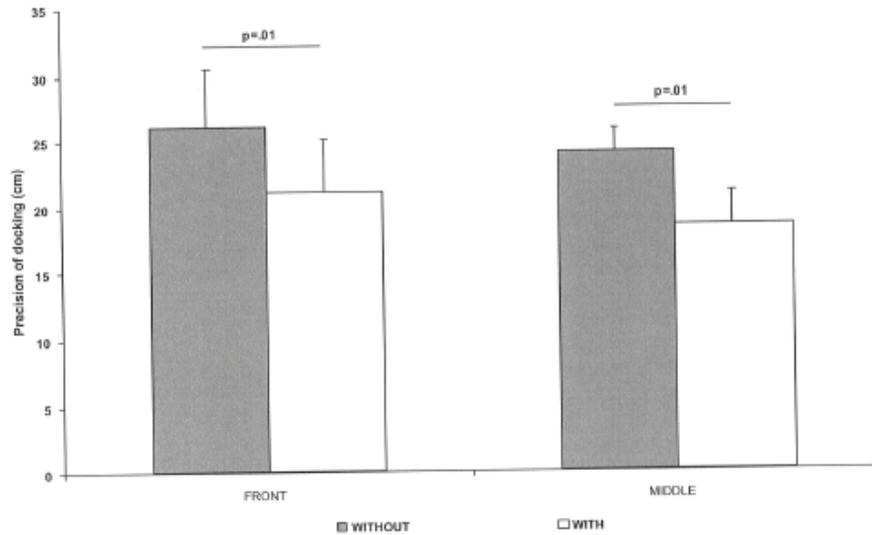


Figure 2. Mean performance (precision of docking) without and with the precision docking system. Results show that bus drivers are more accurate when the docking system is working. Two measurements were taken: from the front of the bus to the curb (front) and from the middle of the bus to the curb (middle).

system is useful," mean = 1.8 ($SD = 0.79$); for "the system is user-friendly," mean = 1.6 ($SD = 1.17$); for "the system improves the precision of docking," mean = 2.3 ($SD = 0.47$).

The means and standard deviations for OPD values are shown in Figure 3 according to the two different driving locations and the five scenarios. The manual and nominal scenarios elicited the shortest OPD values, whereas scenarios involving a docking system dysfunction were shown to elicit higher OPD values.

Standard deviations are very wide, and the OPD data resemble a bimodal mode: A great number of OPD values (135 out of 427) are null. Otherwise, these spread out up to 40 with a mode around 8. This particular distribution leads one to consider the OPD variable binomial (i.e., positive or null, binary outcome). The logistic regression model is suitable for studying the relationships between such a dependent binary variable and the three independent explanatory variables (locations, participants, and scenarios). (The logistic model makes it possible to determine which variable has a significant effect, on the one hand, and to predict the

probability of obtaining a positive OPD, on the other. Interactions between the explanatory variables are also evaluated within this framework. All calculations were made using S-Plus[®] software.) The deviance analysis of the logistic model (Table 1) indicates that the interactions of Location \times Scenario ($p = .17$) and Driver \times Scenario ($p = .12$) did not reach the significant threshold. However, the Driver \times Location interaction was significant ($p = .001$), as was as the simple effect of the scenario ($p < .001$). Only these two significant effects were considered.

Figure 4 shows the fitted parameters of the logistic model according to the scenario variables. The parameter corresponding to the manual mode condition is the lowest. Thus, under this condition, the probability of obtaining a positive OPD is the lowest. The parameter corresponding to the nominal mode condition is higher: There is a higher probability of recording a positive OPD. The nominal mode coefficient is itself smaller than those of the three experimental conditions exhibiting a dysfunction, taken as a whole (at speed and position limits, hidden defect, and driver takes over control). During

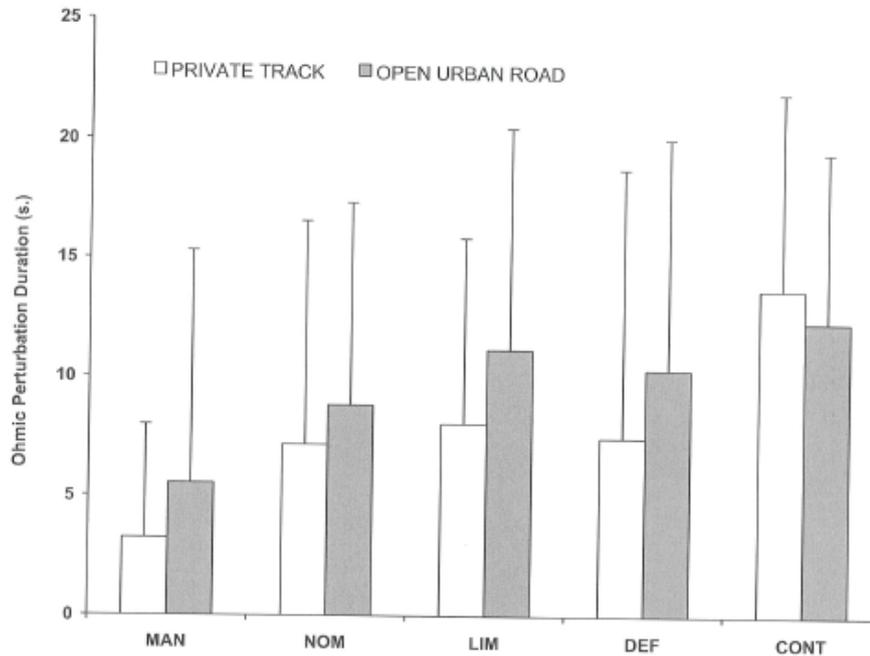


Figure 3. Mean OPD values according to location (private track or open urban road) and to the five scenarios (MAN = manual mode, NOM = nominal mode, LIM = at speed and position limits, DEF = hidden defect, CONT = driver takes over controls).

dysfunction, the probability of observing a positive OPD is highest.

Differences between scenarios may be tested by statistical contrasts of the corresponding coefficients. These are comparable to those used in analysis of variance. By convenient reparameterization of the logistic model, the contrast

between the manual and nominal scenarios can be estimated, for example. A fitted contrast is evidenced: $\alpha = 1.16$, $t(52) = 3.03$, $p = .003$. Comparison between the nominal mode condition and the average of the three conditions exhibiting dysfunction shows that $\alpha = -1.19$, $t(52) = -4.16$, $p < .001$. Comparisons of the

TABLE 1: Deviance Analysis of the Logistic Model Including the Three Simple Effects Plus Their Interactions

Terms	df	Deviance	Residual df	Residual Deviance	p Value (χ^2)
Null			69	217.0	
Driver	6	44.8	63	172.2	<.001
Location	1	22.6	62	149.7	<.001
Scenario	4	53.0	58	96.6	<.001
Driver x Location	6	22.3	52	74.3	.001
Driver x Scenario	24	32.2	28	42.1	.12
Location x Scenario	4	6.4	24	35.7	.17

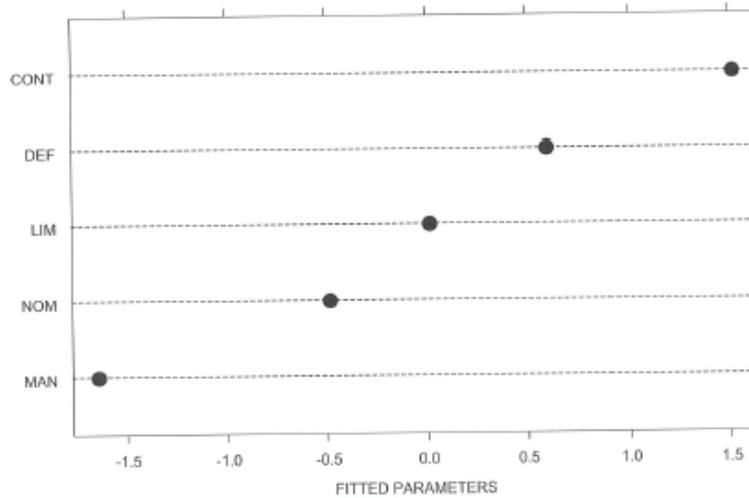


Figure 4. Effects of the five scenarios on mental load. Values estimated by the logistic model appear on the x axis according to the five scenarios (CONT = driver takes over controls, DEF = hidden defect, LIM = at speed and position limits, NOM = nominal mode, MAN = manual mode). The strain undergone by drivers increases from the MAN mode to the CONT mode.

three scenarios involving dysfunction showed that a significant difference appeared when the at speed and position limits condition was compared with the driver takes over control condition, $\alpha = -1.5$, $t(52) = -2.93$, $p = .005$. Conversely, no difference emerged between the at speed and position limits condition and the hidden defect condition, $\alpha = -0.58$, $t(52) = -1.59$, $p = .17$, or between the hidden defect and driver takes over control conditions, $\alpha = -0.92$, $t(52) = 1.80$, $p = .08$.

The interaction between locations and drivers showed that all drivers, with the exception of Driver D, exhibited a probability of obtaining an increase in positive OPD when driving took place on an open urban route (Figure 5).

The OPD was shown to decrease progressively during the nominal scenario session, when this experimental condition was repeated 15 times (Figure 6). The nonparametric homogeneous sequences test showed that differences between OPD values were significant ($p < .05$). Statistical analysis confirmed that no difference emerged between manual mode and nominal mode after the drivers learned how to monitor the docking system (i.e., after habituation).

DISCUSSION

Precision of docking was improved by about 5 cm when the automated system was working. This difference was shown to be statistically significant whether the distance was measured from the front of the bus to the curb or from the middle of the bus to the curb. These objective data are confirmed by the bus drivers' opinion: All mean rated scores were positive on the 7-step scale (from -5, negative opinion, to +5, positive opinion). Such results attest to the reliability of this automated docking system. Furthermore, the system was considered useful and easy to monitor. With reference to drivers' responses to the questionnaire, the system could be seen to facilitate docking and thus decrease the load. Subjective data should be confirmed by objective measures of workload through physiological recordings.

The probability of the ohmic perturbation duration index being different from zero was evidenced by statistical analysis according to the independent variables (i.e., location and scenarios). It was shown that no interaction emerged between scenarios and participants or between

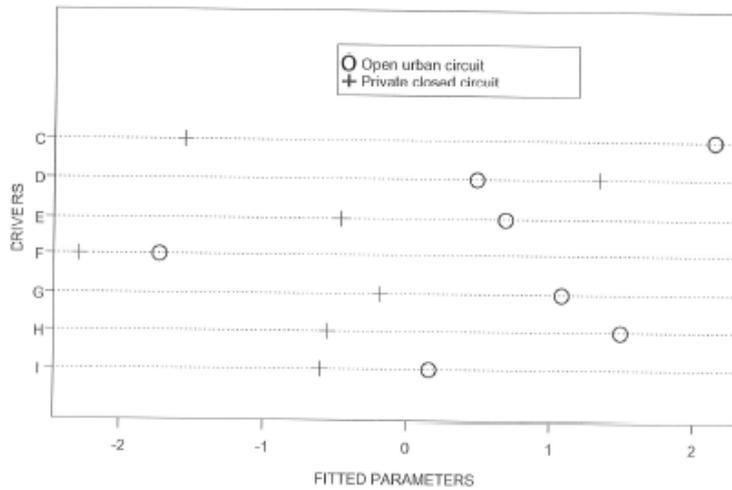


Figure 5. Effects of location (open urban or private closed circuit) on mental load. Values estimated by the logistic model appear on the x axis according to the Drivers \times Locations interaction. When the precision docking system is working (nominal mode), the private closed circuit is shown to elicit a weaker strain when compared with the open urban circuit (with the exception of Driver D; see comments in the text).

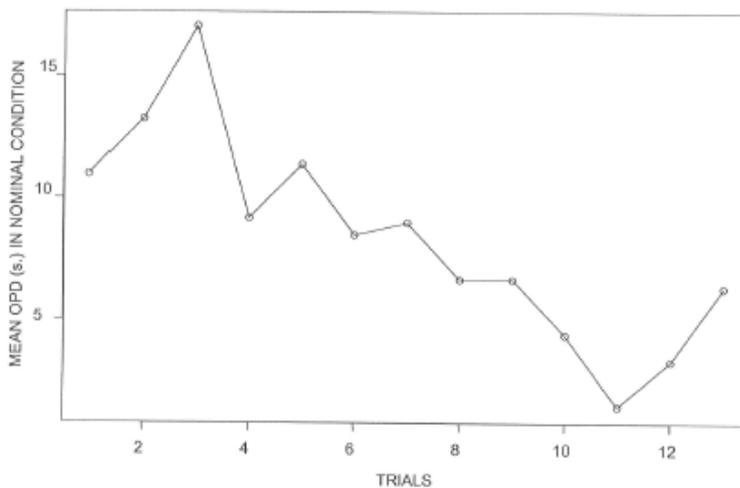


Figure 6. Decrease in OPD upon habituation. Each bus driver performed a series of 13 successive trials. Under the nominal condition, decreasing OPD during trials is related to decreasing strain. Such an evolution is thought to correlate to habituation (i.e., automation of using the precision docking system).

scenarios and locations. Thus the effects of scenarios on workload could be expected to extend to other drivers and to other locations. As expected, differences in OPD were shown to vary with differences in workload elicited by traffic: More information had to be processed in the field, and more uncertainty emerged in the real urban environment than in the experimental situation in a closed circuit. According to general operations related to information processing, more attentional resources must be allocated when people have to drive in the field because of uncertainty about traffic, the extraction of relevant data from the environment, and the control of driving actions. Thus, the greater the workload, the longer the OPD.

A strong scenario effect was evidenced. Two main groups were distinguished among the five scenarios: the manual mode on the one hand and the other four conditions on the other. Because a dysfunction requires drivers to monitor the system and to look into the problem, this additional load leads to an increase in OPD. However, the probability of recording an OPD different from zero was lower when drivers were docking without the system than when using it. The physiological data seem to be inconsistent with the drivers' responses. A simple system check, even when the system works normally, increases workload significantly. Workload was thus higher in the nominal mode than in the manual mode. The docking system therefore seems to

bring about effects opposite those expected: The drivers' workload was made heavier instead of being reduced.

Drivers performed 13 trials with the docking system under the normal condition (i.e., with the system working). OPD was demonstrated to decrease from the 1st to the 13th trial. Thus workload decreased throughout the trials, showing rapid habituation. Monitoring requirements can be considered to be rapidly automated. Decreased OPD is related to automation and learning. Such a result had already been obtained during sports activity (Roure et al., 1999): Learning a motor skill was shown to decrease OPD (as well as other ANS response durations). Consequently, it may be hypothesized that rehearsing docking in the nominal mode would rapidly show OPDs similar to those associated with manual docking. This seems to be con-

firmed by drivers' claims. A decrease in workload when docking under the nominal mode is obtained after training, thus eliciting monitoring automation. In general, intelligent transport systems could improve safety under certain conditions. The requirement is to learn how intelligent technologies work. In the present study, drivers' adaptation was rapidly obtained. One or two days of training may be sufficient to reach a reliable competence level. If such precautions are not taken, intelligent traffic systems may adversely affect safety by increasing mental resources allocation instead of lessening it.

The probability of recording an OPD different from zero was lower when drivers were docking under normal conditions than when they encountered a dysfunction. This result appears logical and may be easily explained: If the system does not work as expected, additional resources must be allocated to it. Dysfunction leads to a heavier workload, and thus the OPD is longer. Knowing which dysfunction elicits the highest workload is an issue. Two-by-two comparison showed that the longest OPDs were recorded when drivers had to take over control (CONT). However, differences reached the significance threshold only when the driver takes over control mode was compared with the at speed and position limits mode. It may therefore be concluded that a system dysfunction elicits exactly the same increase in workload, whatever its origin.

As expected, OPD was lower during docking on the circuit than in the field. Even for the professional drivers with long driving experience, docking maneuvers in the field induced high attentional demands, thereby increasing workload. Only one participant (Driver D) could be considered an outlier in this regard: For him, longer OPDs were recorded on the closed circuit. Such a result may be explained by experimental circumstances. This driver's first session was conducted on the closed circuit, and he said that he was afraid of being judged with a system he had not had the opportunity to test previously. Using a new system made the task an extra burden for him. During the session conducted in the field, he already knew the system and the requirements of the experiment, and he seemed more relaxed despite having to drive in an urban open-field situation. Another

case study should be underscored: Driver C showed the highest OPD when docking in the field. These results confirmed his loss of confidence in the system, as he felt he would have docked better without it. Finally, these two case studies evidence the complexity of human-machine interactions. Despite general tendencies that can be evidenced by studying behavior in a group of participants, the specific characteristics of the individual should also be taken into account.

CONCLUSION

Electrodermal activity recordings have been shown to be reliable tools in evaluating mental load in the field. However, most researchers agree that a multiple-measure approach in psychophysiology is more meaningful (Collet, Delhomme, Dittmar, Khardi, & Vernet-Maury, 1999). The present results should be confirmed through other indicators, such as cardiorespiratory and thermovascular measurements, along with electrodermal recordings.

The safety element of ITSs cannot be over-emphasized. Pedestrian accidents are the most severe of transit accidents. Apart from restrictions, which we have underscored (habituation and learning how the system works, taking into account specific relationships between the individual and the ITS), new intelligent transport systems are designed to increase safety. It could be hypothesized that the added functionality of a precision docking system, if interfaced with a collision avoidance system, should give both drivers and pedestrians an added safety margin. This should be verified experimentally. Allowing people with disabilities, elderly people, and children to safely board and egress are important considerations in developing these systems.

REFERENCES

- Bonessio, W. (1992). *Electrodermal activity*. New York: Plenum.
- Bonessio, W. (1993). Psychophysiology in the work place – Goals and methods. In P. Ullsberger (Ed.), *Psychophysiology of mental workload* (pp. 35–41). Berlin: Bundesanstalt für Arbeitsschutz.
- Caldwell, J. A., Wilson, G. F., Cettingue, M., Gaillard, A. W. K., Gunder, A., Lagarde, D., et al. (1994). Psychophysiological assessment methods. In *Advisory Group for Aerospace Research and Development Advisory Report 724* (pp. 13–15). Neuilly-sur-Seine, France: North Atlantic Treaty Organization, AGARD.
- Collet, C., Delhomme, G., Dittmar, A., Khardi, S., & Vernet-Maury, E. (1999). Electrodermal tonic level variations associated with thermovascular and cardiorespiratory recordings as reliable indices for the detection of drowsiness in automobile drivers [Abstract]. *Psychophysiology*, 36, S21.
- Farber, B. (2000). New vehicle technologies for supporting the mobility of the elderly. *Journal of Gerontology and Geriatrics*, 33, 178–185.
- Fowles, D. C., Christie, M. J., & Edelberg, R. (1981). Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, 18, 232–239.
- Furley, J. J., & Scher, H. (1989). The law of initial values: Differentiated testing as an empirical generalization versus crystallization as a methodological rule. *Psychophysiology*, 26, 120–121.
- Gaillard, A. W. K. (1993). Comparing the concepts of mental load and stress. *Ergonomics*, 36, 991–1005.
- Hensly, K. C., Liao, J., & Milgram, P. (1997). Combining time and intensity effects in assessing operator information-processing load. *Human Factors*, 39, 30–47.
- Nanthavanij, S., Yerradee, P., & Tschäpöchel, K. (1995). An intelligent safety feature for AGV's economic operations: A simulation analysis. *Journal of Human Ergology (Tokyo)*, 24, 75–80.
- Noy, Y. I. (1997). Human factors in modern traffic systems. *Ergonomics*, 40, 1016–1024.
- Parasuraman, R. (1985). Vigilance, arousal and the brain. In A. Gale & J. A. Edwards (Eds.), *Attention and performance II: Physiological correlates of human behavior* (pp. 35–55). London: Academic.
- Priez, A., Petit, C., Tarricq, C., Dittmar, A., & Vernet-Maury, E. (1992). Neurosensors and characterization of driver's stress during critical situations. In A. Dittmar & J. C. Froment (Eds.), *Neuro-magnetism, neuro-sensors and actuators: 14th Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 245–250). Lyon, France: National Center of Scientific Research.
- Roure, R., Collet, C., Deschaumes-Molinaro, C., Dittmar, A., Radu, H., Delhomme, G., et al. (1999). Imagery quality estimated by autonomic response is correlated to sporting performance enhancement. *Physiology and Behavior*, 66, 65–72.
- Vernet-Maury, E., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., & Dittmar, A. (1993). Autonomic nervous system activity and mental workload. In P. Ullsberger (Ed.), *Psychophysiology of mental workload* (pp. 42–48). Berlin: Bundesanstalt für Arbeitsschutz.
- Vernet-Maury, E., Robin, D., & Dittmar, A. (1995). The Ohmic perturbation duration: An original temporal index to quantify electrodermal response. *Behavioral Brain Research*, 67, 103–107.

Christian Collet received a Ph.D. in neurophysiology in 1995 from Claude Bernard University, where he is a lecturer in neurophysiology.

Claire Petit received her master's degree in neurophysiology in 1986 from Paris V University. She is a researcher in the Ergonomics and Human/Machine Interactions Department of the car manufacturer Renault.

Stephane Champely received a Ph.D. in biometrics in 1993 from Claude Bernard University, where he is a lecturer in statistics in the Department of Sports.

Andre Dittmar received his Ph.D. in human neurophysiology in 1986 from Claude Bernard University. He is director of the Department of Biomedical Microsensors and Microsystems, a laboratory of the National Institute of Applied Science, Villeurbanne, France.

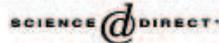
Date received: January 25, 2002

Date accepted: August 13, 2003

VIII-6 Stroop color- word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation



Available online at www.sciencedirect.com



BIOLOGICAL
PSYCHOLOGY

Biological Psychology 69 (2005) 195–203

www.elsevier.com/locate/biopsycho

Stroop color–word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation

Christian Collet^{a,*}, Claire Petit^b, Alain Priez^b, André Dittmar^c

^a*Claude Bernard University, CRIS, EA 647, Federal Institute of Neurosciences Lyon, F-69 622 Villeurbanne Cedex, France*

^b*Renault, Ergonomics and Human/Machine Interaction Department, F-78288 Guyancourt Cedex, France*

^c*National Scientific Research Center, UMR 5511, F-69 621 Villeurbanne Cedex, France*

Received 12 January 2004; accepted 12 July 2004

Available online 22 September 2004

Abstract

The aim of this experiment was to study drivers' performance when confronted with a critical crash avoidance situation. Subjects were asked to cover three laps of a private circuit (4 min per lap), respecting speed limits. During the last lap, an inflated dummy car, placed at an intersection, was pulled onto the traffic lane. The synchronization signal releasing the obstacle was triggered to make the braking distance too short, thus requiring subjects to brake and turn the driving wheel simultaneously. Before driving, subjects completed the Stroop color–word test. Skin conductance (SC) was recorded continuously, before and during driving. Subjects who performed the least well also performed the least well to Stroop test. The SC level showed that subjects avoiding the obstacle were more aroused than those who crashed into the dummy car. Performance to Stroop test and physiological arousal were thus shown to be determining factors in management of a critical driving situation.

© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Driving; Crash avoidance; Electrodermal activity (skin conductance); Stroop test

1. Introduction

Safety remains one of car manufacturers' predominant preoccupations. Greater efforts must be directed toward understanding and adapting human behavior in road transportation

* Corresponding author. Tel.: +33 4 72 43 28 42; fax: +33 4 72 43 28 46.
E-mail address: christian.collet@univ-lyon1.fr (C. Collet).

in order to limit the number of vehicle crashes. According to Noy (1997), there exists a need to expand the scope of traditional human factors in understanding human interactions with the elements of the system (road and car equipment, interactions among road users, ...). In France, road crashes resulted in 7242 deaths in 2002, 5731 in 2003. Accidents are difficult to avoid if drivers' behavior is not carefully adapted. Despite improvements to vehicle structural reinforcement and the integration of safety systems to vehicles (braking assistance system, air-bags, ...) accident severity remains so great that in 50% of these, passive technical safety abilities are exceeded. The answer is thus to improve active safety by assessing drivers' behavior either by elaborating a cognitive model of the task or by creating high-performance tools and evaluating human/machine interactions.

Since driving requires mental information-processing operations, non-automated tasks elicit a supplementary allocation of mental resources (e.g. focused attention). In such cases, drivers may carry a mental overload, this being a state which may be defined as an excessive demand on perceptual and cognitive resources (visual and auditory perception, memory and attention, *inter alia*). With respect to general information-processing ability, automated driving skills require fewer mental resources. However, most driving situations remain monotonous and may elicit a decrease in mental resource allocation. By orienting sensorial systems to environmental informations, attention plays a vital role in maintaining human safety in motor vehicle driving. However, drivers must learn to orient attention with the aim to select useful cues among others. This process, which may be called vigilance, is directly determined by arousal. With reference to Sanders' model (1990), arousal is a relatively non-specific concept, which influences the first information processing stages by determining how useful cues are extracted from the environment. This process has a directly behavioral connotation and involves sustained attention, i.e. readiness to detect and respond to environmental changes: it is an active, performance-related process involving perception and is defined as vigilance by Caldwell et al. (1994). Arousal may influence vigilance in an obvious way but does not require the ability to respond to signals correctly. The environment plays an important role in maintaining attention, and various cues may overcome a low arousal level, but only temporarily. Finally, a high arousal level would not automatically imply adequate behavioral vigilance, except when sensorial systems are focused correctly. Conversely, it is difficult to be vigilant if the arousal level is too low. Thus, the arousal level may be considered an important factor of behavioral efficiency.

The autonomic nervous system is known to give an estimation of subjects' arousal, especially through tonic autonomic changes (Boucsein, 1993; Vernet-Maury et al., 1993; Collet et al., 2003). Electrodermal activity is dependent upon the sympathetic nervous system (Boucsein, 1992). This system is specialized in mobilizing energy resources, in response to internal and external milieu demands. Its role is to face up to emergency situations. Subjects' physiological arousal may thus be evaluated by recording electrodermal activity while performance is achieved. Consequently, the influence of arousal variation on performance could be determined accurately (Collet et al., 1996).

While managing critical driving situations correctly may be dependent upon the physiological arousal level, the role of individual personality factors may be questioned. By generating interference, i.e. conflict situations, between colors and words, the Stroop color-word conflict test is one of the most commonly used to elicit mental stress,

associated with changes in neuroendocrine functions (Biondi and Picardi, 1999). Subjects sensibility to interference is thus evaluated by the number of items performed during 90 s, i.e. by the speed at which the test is carried out. The slower the conflict is solved, the greater the sensibility to stress (or the lower the resistance to stress). Thus, the ability to overcome interference is interpreted as the ability to resist to the stress elicited. Possible consequences of this personality factor on driving situation may be questioned, particularly in critical situation of crash avoidance, which is thought to be highly stressful.

Among the 38,000 corporeal injuries involving at least one car in France in 1990, nearly 14,000 involved two vehicles only. More than 3200 car accidents occurred on non-urban roads and particularly at road intersections. The aim of this experiment was to study drivers' behavior when a critical situation occurred at crossroads. It was hypothesized that behavioral efficiency was dependent upon two main factors, the first being related to physiological arousal, the second depending upon a personality trait i.e. sensibility to stress, evaluated by the Stroop color–word conflict test.

2. Material and method

2.1. Subjects

Subjects were all men workers from Renault vehicle company but were not aware of the aim and scope of the experiment. They were aged from 22 to 48 (mean = 30.4, standard deviation (S.D.) = 6.9). All the volunteers performed the Stroop test, and among them, 100 subjects were distributed into four homogenous groups to perform the driving test according to their results in the Stroop color–word test, to age and driver's licence tenure. As subjects were recruited at their workplace, the experimental population resulted in under-representation of elderly people. However, the sample represented 70% of the driver population. Subjects gave their informed consent to take part in the experiment and were told that while they were driving, a critical situation might occur but they did not know what kind of situation nor when. To prevent any communication among subjects, the participants who were waiting in the parking area were isolated from those who already performed the test.

2.2. Experimental design

Subjects were told to cover three laps of a private circuit, the sequence lasting about 14 min. The circuit was made up of a course with connecting roads, parts of the circuit track and a two-lane road (width = 7 m) delimited by cones in an open area. The course included a number of intersections, two of these being in the part of the course delimited by cones. At these two intersections, two white cars were stopped, in conformity with the stop signal placed on their course. Sitting at the driving wheel, subjects' visibility was restricted by artificial walls which prevented them from seeing the cars stopped at the intersection until 30 s before crossing the road. The other cross-roads were relatively open or hidden by vegetation. The course was discovered by each subject at the beginning of the experiment and subjects waiting in the parking area had no contact with those who had already

completed the test. Subjects were required to drive in conformity to speed limits: 100 km/h on straights and 80 km/h on curves. After leaving the parking area, subjects came onto the circuit by a connecting road. They were accompanied by an experimenter (professional driver) who was seated on the front passenger seat. He verified that speeds were consistent with instructions and ensured subjects' safety by correcting any manoeuvre that might prove dangerous. During the last lap, the white car, placed at the intersection on the right of the course the subject was driving on, was removed and an inflated dummy car, with the same features, took its place. The subject's car, by passing an optical beam, triggered a detector signal, which released the dummy car. The walls concealing the intersection did not allow subjects to see the dummy car until it was pulled into their lane. The obstacle car crossed half the intersection, and then stopped. Considering the car's speed at that moment (100 km/h) and a mean reaction time measured at 600 ms, the braking distance was too short to avoid the obstacle. Depending on braking intensity, the average speed of the subjects' car was between 40 and 45 km/h when it reached the level of the obstacle. The left lane remaining free allowed subjects to avoid the dummy car by turning the driving wheel. According to these conditions, two main patterns of behavior were expected to be observed: braking was considered the incorrect manoeuvre as this action led to crash the dummy car whereas braking associated with turning the driving wheel was considered the correct manoeuvre allowing subjects to avoid the collision. The car was equipped with the anti-lock braking system (ABS). This system kept the car under driver's control even in case of very hard braking because the wheels go on turning. Thus, the car 'responded' to any action on the driving wheel. These conditions were considered the independent variable. Performance was the first dependent variable and was evaluated by analyzing action carried out by the drivers. Skin conductance (SC) was the second dependent variable and was expected to evolve simultaneously with arousal in case of arousal changes during driving. Finally, the critical situation was expected to elicit a SC response at the actual or potential time of the collision.

2.3. *Physiological recording*

Skin conductance (SC) was recorded using 30 mm² unpolarizable, Ag/AgCl electrodes (Clark Electromedical Instruments). According to traditional recommendations (Fowles et al., 1981), sensors were placed on the second phalanx of the index and the third digit of the non-dominant hand, held by adhesive tape. A conductive gel (Teca, ref. 822-201210) was applied between SC sensors and the skin to improve sensors/skin contact. Conductance was measured with 15 μ A DC current (current density = 0.5 μ A/mm²). SC evolution, i.e. skin conductance level (SCL) paralleled subjects' arousal evolution i.e. when arousal increased, SCL increased and vice versa. According to great SCL difference among subjects and to allow inter-subject comparison, SCL was normalized: SCL was recorded at rest during 2 min before driving, while subjects sat at the driving wheel without any stimulation and then averaged to be considered the reference. For each subject, SCL during driving was averaged every 30 s and was then divided by the reference to make data comparable among subjects (Collet et al., 2003). The principle of normalized SCL was thus the ratio of mean SCL recorded while driving every 30 s and mean SCL at rest. Skin conductance response (SCR) was measured by its duration. A temporal index was shown to be more reliable than

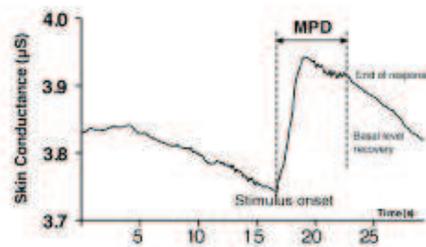


Fig. 1. Example of skin conductance recording and Mhomic Perturbation Duration (MPD) index computation. MPD is measured at the very beginning of the sudden increase, which occurs simultaneously to stimulus initiation. It is followed by many fluctuations at a higher conductance level, compared to the tonic level before stimulation. The period then ends when recovery shows no fluctuations i.e. when the slope resembles that observed before stimulation. Thus, MPD is defined as the period during which a subject remains under stimulation effect, i.e. the time during which he processes the information related to the stimulus.

classical indices based on recovery time (Vernet-Maury et al., 1995). The time during which the subject 'responds' to stimuli defines the Mhomic Perturbation Duration (MPD index Fig. 1) and reveals the duration during which subjects remained under stimulus effect. This duration was also shown to be more reliable than response amplitude as this latter index is known to be dependent upon initial value (Furedy and Scher, 1989). Electrodermal response is thought to integrate cerebral processes, i.e. cognitive and emotional response to stimulus (Collet et al., 1999).

2.4. Statistical analysis

Subjects from the group who performed well were compared to those who performed the incorrect manoeuvre using the Chi-square test. Normalized SCL related to each driving behavior was compared using the paired *t*-test according to performance. Two by two comparisons of normalized SCL of each period of 30 s were also performed using analysis of variance. SCR recorded at the potential crash (correct manoeuvre) or actual crash (incorrect manoeuvre) were compared with analysis of variance.

3. Results

The proportion of subjects who braked only was 51% (incorrect manoeuvre) whereas 45% of subjects co-ordinated the two actions of braking and turning the driving wheel (correct manoeuvre). An unexpected behaviour was observed, representing 4% of subjects: no action at all, i.e. no braking nor turning the driving wheel. As, at first, the Stroop test distinguished 11 categories to classify individual scores, some grouping has been carried out: categories from 0 to 2 (from -18 and less to -8 and from -27 and less to -10 in women and men, respectively) were considered the 'very low resistance to stress' group; categories from 3 to 5 (from -7 to $+1$ and from -9 to 0 in women and men, respectively) were considered the 'low resistance to stress' group; categories from 5 to 7 (from $+2$ to $+10$ and from $+1$ to $+10$ in women and men, respectively) were considered the 'high resistance

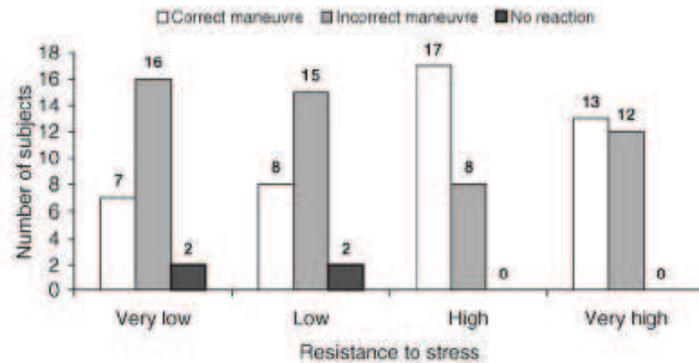


Fig. 2. Performance in the crash avoidance test as a function of resistance to stress. Subjects who performed a correct manoeuvre (braking and turning the wheel) were the most numerous in the 'high' and 'very high resistance to stress' groups. Conversely, subjects who performed an incorrect manoeuvre were the most numerous in the 'low' and 'very low resistance to stress' groups. Unexpected behavior, i.e. 'no reaction' was observed in the 'low' and 'very low resistance to stress' groups only.

to stress' group; categories from 8 to 10 (from +11 to +20 and more in women and men) were considered the 'very high resistance to stress' group. Thus, only four categories will be considered in this study. Fig. 2 represents subjects' performance as a function of Stroop color-word test results.

According to each of the four Stroop color-word test groups, the proportions of subjects who were successful with the driving task or failed it were different. The Chi-square was 12.80 and showed a significant difference among the four groups: $P = 0.045$. Statistical computation was carried out including unexpected behavior, i.e. 'no reaction'. As such behavior was not often observed (only four times) and as the Chi-square test must avoid values equal to 0, computations were made by taking into account the two expected patterns of behavior only. Chi-square = 8.59, $P = 0.035$. As comparisons between the 'very low' and 'low resistance to stress' groups, on the one hand, the 'very high' and 'high resistance to stress' groups, on the other, were not significant, data may be pooled (Chi-square = 0, $P = 1$, NS and Chi-square = 0.75, $P = 0.39$, NS, respectively). When only two groups of 'low' and 'high resistance to stress' were considered, Chi-square = 6.16, $P = 0.013$.

Skin conductance level (SCL) and skin conductance response (SCR) were studied as a function of driving performance. Both groups performing a correct or incorrect manoeuvre increased their SCL as soon as they began to drive (Fig. 3). The two curves then parted until the end of the driving sequence. As shown by Fig. 3, the paired t -test indicated that SCL recorded in subjects who performed well was differentiated from SCL recorded in subjects who failed to avoid the dummy car: $t = -17.2$, $P < 0.0001$. Furthermore, analysis of variance comparing each SCL value corresponding to each period of 30 s showed that only six comparisons out of 29 did not reach the significant threshold. Standard deviation (S.D.) around the averaged SCL was from 0.1 to 0.3 in the curve representing incorrect manoeuvre and from 0.4 to 0.6 in the curve representing correct manoeuvre. SCR recorded

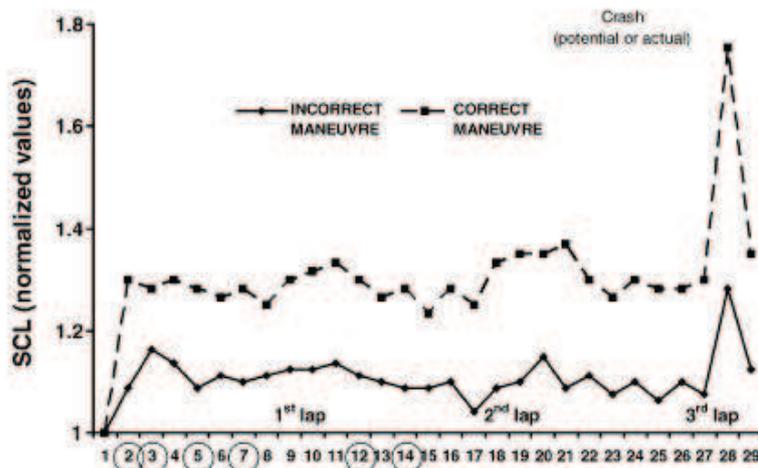


Fig. 3. Normalized skin conductance level (SCL) recording as a function of performance (correct or incorrect manoeuvre). Due to the great inter-subject difference in SCL, normalization made comparison possible between the two groups. Subjects who performed well (dotted line) increased their arousal level higher than those who failed to avoid the obstacle (full line). The numbers of the abscise axis represent periods of 30 s. Comparisons of mean SCL were performed for each period. Those, which did not reach the significant threshold, are shown by surrounded numbers.

when the potential or actual crash occurred was longer when the manoeuvre was correct. A shorter response was recorded when the obstacle was collided with. $F(1, 98) = 5.54$, $P = 0.02$. Mean duration was 17 s (S.D. = 11 s) and 12 s (S.D. = 10 s) in correct and incorrect manoeuvres, respectively.

4. Discussion

As the task required coordination of braking and turning the driving wheel under time pressure and as this was the only way to avoid the obstacle, the task was difficult to handle. The antilock braking system (ABS) is known to keep the vehicle under driver control because the road wheels go on turning, even in the event of extreme braking. Such active safety systems are dependent upon human action and/or regulation, (e.g. non-contact obstacle sensors) and may help the driver to control critical situations. Driving a vehicle equipped with the ABS system has certainly enhanced performance. This system prevented the front wheels to be blocked by a very hard braking. In such a case, the car trajectory would have remained linear, despite the intended change of direction. However, to be really effective, it has been shown that drivers should know how this safety device works (Priez et al., 1992).

Drivers' arousal should be high enough to ensure safety during driving. The arousal level is under the control of the sympathetic system and skin conductance level (SCL) is known to give an accurate estimation of arousal and its variation (Boucsein, 1993; Collet et

al., 2003). SCL recorded in subjects who performed well was higher than that in subjects who crashed the car. Thus, it may be concluded that arousal influenced performance directly as higher arousal level would have been necessary to deal with such a problematic situation under hard time constraints. Being activated enough also requires vigilance, i.e. focusing attention on the surrounding context, on signals which could give information on driving conditions and help drivers in decision-making, particularly in a critical collision avoidance situation. It has been known for a long time that in general, performance evolves as a function of arousal, along an inverted-U curve (Yerkes and Dodson, 1908). In the group of drivers who crashed their car, the arousal level was not high enough to ensure safety. Inadequate arousal thus affected vigilance, i.e. the ability to process information correctly and led to inappropriate action with regard to task requirements. With reference to Fig. 3, the curves corresponding to each arousal level separated as soon as subjects began to drive. Thus, SCL level could be considered a predictable index of performance, in this particular situation: experimenters may with great probability be aware in advance of what the performance will be.

Subjects were classified in one of the four groups of the Stroop color-word test. Performance was significantly affected by the 'resistance to stress' variable. The experimental situation may be compared to the Stroop test requirements. By complying with the Stroop test, subjects may solve a conflict, which occurs as soon as the name of a color is written in another color, i.e. between a color code and a semantic code. During the driving situation, the conflict occurs between the stop signal, which must be respected by the driver, and the behavior of the same driver who does not respect this signal. In such a case, the performance of subjects with the lowest results in the Stroop test is affected drastically. Furthermore, the driving and the Stroop test were both performed under hard time constraints. Thus, requirements of the two situations were quite the same. However, it may not be concluded that in other driving situations, decision-making would be inadequate. In the same way, nothing allows one to conclude that these subjects would be non-efficient in situations without such time constraints. Low resistance to stress may also be counterbalanced by an adequate arousal level. One outcome resulting from this experiment was the observation of unexpected behavior: 4% of subjects remained motionless when the critical situation occurred, leading to a 100 km/h collision with the dummy car. The conflict was so intense that subjects did not find any solution during the very short period allocated to decision-making. Such behavior may be close to that observed in animals facing a predator. Usually fleeing, sometimes fighting, 'freezing' makes the animal absolutely motionless. 'Freezing' in animal behavior may be compared to the 'no reaction' behavior in this experiment. Little is known about such human behavior and further investigation is thus needed.

References

- Biondi, M., Picardi, A., 1999. Psychological stress and neuroendocrine function in humans: the last two decades of research. *Psychotherapy and psychosomatics* 68, 114–150.
- Boucsein, W., 1992. *Electrodermal activity*. Plenum Press, New York.
- Boucsein, W., 1993. *Psychophysiology in the work place—goals and methods*. *Psychophysiology of Mental Workload*, Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Berlin.

- Caldwell, J.A., Wilson, G.F., Cetinguc, M., Gaillard, A.W.K., Gunder, A., Lagarde, D., Makeig, S., Myhre, G., Wright, N.A., 1994. Psychophysiological assessment methods. Advisory Group for Aerospace Research and Development (advisory report 324), North Atlantic Treaty Organization, Neuilly sur Seine, France, pp. 13–15.
- Collet, C., Roure, R., Rada, H., Dittmar, A., Vemet-Maury, E., 1996. Relationships between performance and skin resistance evolution involving various motor skills. *Physiology and Behavior* 59, 953–963.
- Collet, C., Delhomme, G., Dittmar, A., Khadi, S., Vernet-Maury, E., 1999. Electrodermal tonic level variations associated with thermovascular and cardiorespiratory recordings as reliable indices for the detection of drowsiness in automobile drivers. *Psychophysiology* 36, S21.
- Collet, C., Averty, P., Delhomme, G., Dittmar, A., Vemet-Maury, E., 2003. Subjective aspects of mental load in air-traffic control. In: Hockey, G.R.J., Gaillard, A.W.K., Burov, O. (Eds.), *Operator Functional State and Impaired Performance in Complex Work*. Plenum Press, New York, (NATO ASI series, Series A, Life Sciences), pp. 291–302.
- Fowles, D.C., Christie, M.J., Edelberg, R., Grings, W.W., Lykken, D.T., Venables, P.H., 1981. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology* 18, 232–239.
- Furedy, J.J., Scher, H., 1989. The law of initial values: differentiated testing as an empirical generalization versus enshrinement as a methodological rule. *Psychophysiology* 26, 120–121.
- Noy, Y.I., 1997. Human factors in modern traffic systems. *Ergonomics* 40, 1016–1024.
- Priez, A., Petit, C., Tarrere, C., Dittmar, A., Vernet-Maury, E., 1992. Neurosensors and characterization of driver's stress during critical situations. In: Dittmar, A., Froment, J.C. (Eds.), *Neuro-magnetism, Neuro-sensors and Actuators*. 14th Annual Conference of The IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 245–250.
- Sanders, 1990. Issues and trends in the debate on discrete versus continuous processing of information. *Acta Psychologica* 74, 123–167.
- Vemet-Maury, E., Deschaumes-Molinero, C., Delhomme, G., Dittmar, A., 1993. Autonomic nervous system activity and mental workload. *Psychophysiology of Mental Workload*, Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Berlin.
- Vemet-Maury, E., Robin, O., Dittmar, A., 1995. The ohmic perturbation duration: an original temporal index to quantify electrodermal response. *Behavioral Brain Research* 67, 103–107.
- Yerkes, R.M., Dodson, J.D., 1908. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology* 18, 458–482.

IX Bibliographie

1. Alleaume S. , Thomas C., Perron T., Le Coz J.Y - Emergency Braking Patterns Prior to Real-World Crashes. *FISITA World Automotive Congress*, September 27-October 1, 1998, Paris, FRANCE, Paper n° F98S579.
2. Backs RW, A comparison of factor analytic methods of obtaining cardiovascular autonomic components for the assessment of mental workload, *Ergonomics*. 1998 May;41(5):733-745.
3. Boucsein, W. Electrodermal activity. *Plenum Press, eds. New-York and London*; 1992.
4. Boucsein, W. Psychophysiology in the work place – Goals and methods. In Ullsberger, P. (Ed.) *Psychophysiology of mental workload*, Bundesanstalt für Arbeitmedizin, Berlin, 1993, 35–41.
5. Bensafi, M.; Rouby, C.; Farget, V.; Bertrand, B.; Vigouroux, M.; Holley, A. Psychophysiological correlates of affects in human olfaction. *Clinical Neurophysiology*. 2002, 32: 326-332.
6. Bernstein, A. To what does the orienting response respond? *Psychophysiology*. 1969, 6: 338-350.
7. Bradley, M.M.; Cuthber, B.N.; Lang, P.J. Startle reflex modifications: emotion or attention ? *Psychophysiology*. 1990, 27: 513-522.
8. Bradley, M.M.; Lang, P.J., Affective reactions to acoustic stimuli. *Psychophysiology*. 2000, 37: 204-215
9. Bradley, M.M.; Codisoti, M.; Cuthber, B.N.; Lang, P.J. Emotion and motivation I: Defensive and Appetitive Reactions in picture processing. *American Psychological Association*. 2001, 1(3): 276-298.
10. Brand, G.; Millot, J.L.; Biju, C. Comparison between monorhinal and birhinal olfactory stimulations in bilateral electrodermal recordings. *Life Science*. 2000, 323: 959-965.
11. Brand, G.; Millot, J.L.; Saffaux, M.; Morand-Villeneuve, N. (2002). Lateralization in human nasal chemoreception: differences in bilateral electrodermal responses related to olfactory and trigeminal stimuli. *Behavioral Brain Research*. 2002, 133: 205-210.
12. Catchpole, J.E., Macdonald, W.A., Bowland, L., The influence of age- related and experience-related factors on reported driving behaviour and crashes. *Report for Federal Office of Road Safety*, 1994
13. Collet, C.; Delhomme, G.; Dittmar, A. Les réponses végétatives de conducteurs automobiles lors d'une tentative d'évitement de choc à vitesse élevée. *Science et Motricité*. 1994, 24: 20-29.
14. Collet, C.; Dittmar, A.; Vernet- Maury, E. Programming or inhibiting action: evidence for differential autonomic nervous system response patterns. *International Journal of Psychophysiology*. 1999, 32: 261-276.
15. Collet, C., Delhomme, G., Dittmar, A., Khardi, S., & Vernet-Maury, E. Electrodermal tonic level variations associated with thermo vascular and cardio respiratory recordings as reliable indices for the detection of drowsiness in automobile drivers [Abstract]. *Psychophysiology*, 1999, No. 36:21.

16. Collet C., Petit C., Priez A., Brigout C., Dittmar, A. Effects of a precision docking system on mental load in bus drivers during tight manoeuvre. *Human Factors* 2003, 45 : 539-548.
17. Collet, C., Petit, C. Priez, A. & Dittmar, A. Stroop color-word test, arousal, electrodermal activity and performance in a critical driving situation. *Biological psychology*, 2005, 69 : 195-203.
18. Christ, R., Smuc, M. Gatscha, M., Schmotzer, C., & Otzelberger, B. *A field study on cruise control*, 2000, On-line paper : www.safexperiments.com/eng/main/experimente.html.
19. Critchley HD, Electrodermal responses: what happens in the brain. *Neuroscientist*. 2002 2 :132-42. Review
20. Crundall D., Chapman P., Phelps N., Underwood G. Eye Movements and hazard perception in police pursuit and emergency response driving. *Journal of Experimental Psychology*. 2003, 9 : 163-174.
21. Dementienko, V.V.; Dorokhov, V.B.; Koreneva, L.G.; Markov, A.G.; Shakhnarovich, V.M. The characteristics of the electrodermal activity during changes in the level of human wakefulness. *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I. P. Pavlova*. 1999, 49(6): 926-935.
22. De Ramus,R., L'effet de l'âge du conducteur et d'expériences sur l'évaluation des risques et la prévision des risques». *Électronique thèses de doctorat d'UMass Amherst*. Papier AAI3188682, 2005.
23. DeWaard D., Hulst van der, M., Hoedemaeker, M. and Brookhuis, K.A. Driver behaviour in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1999, 1: 67-82.
24. Fowles, D. C., Christie, M. J., & Edelberg, R. Publication recommendations for electrodermal measurements. *Psychophysiology*, 1981, 18:232-239.
25. Frith, C.D.; Allen, H.A. The skin conductance orienting response as an index of attention. *Biological Psychology* 1983, 17: 27-39
26. Furedy, J. J., & Scher, H.. The law of initial values: Differentiated testing as an empirical generalization versus enshrinement as a methodological rule. *Psychophysiology*, 1989, 26 :120-121.
27. Gaillard, A.W.K. Comparing the concepts of mental load and stress. *Ergonomics*, 1993, 36, 991-1005.
28. Gati, I.; Ben-Shakhar, G.; Avni-Liberty, S.. Stimulus novelty and significance in electrodermal orienting responses: The effects of adding versus deleting stimulus components. *Psychophysiology*. 1996, 33 : 637-643.
29. Gibson, J.J. The Theory of Affordances *In R. Shaw & J Bransford (Eds.). Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology. Hillsdale, 1977 (pp. 67-82).* NJ: Lawrence Erlbaum.
30. Goldwater, B.C. Effects of continuous visual stimulation on the orienting reflex to tone stimuli. *Psychophysiology*. 1979, 17: 311.
31. Greenwald, M.K.; Cook, E.W.; Lang, P.J. Affective judgement and psychophysiological response: Dimensional covariation in the evaluation of pictorial stimuli. *International Journal of Psychophysiology*, 1989, 33: 51-64.
32. Hart, S. G., & Staveland, L. E. Development of a multi-dimensional workload rating scale: Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human mental workload*, 1988, 139-183.
33. Hastrup, J.L. Effects of electrodermal lability and introversion on vigilance decrement. *Psychophysiology*. 1979, 16: 302-310.

34. Hubert, W.; Jong-Meyer, R. Psychophysiology response patterns to positive and negative Film stimuli. *Biological Psychology*. 1990, 31: 73-93.
35. Hugdahl, K.; Cognitive influences on human autonomic nervous system function. *Current Opinion in Neurobiology*. 1996, 2:252-258. Review
36. Jordan, P.W., An introduction to usability. *London :Taylor & Francis* 1998
37. Khalfa, S.; Peretz, I.; Blondin, J.P.; Robert, M. Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans. *Neuroscience Letters*. 2002, 328: 145-149.
38. Klingberg T. Limitations in information processing in the human brain: neuroimaging of dual task performance and working memory tasks. *Progress in Brain Research*. 2000, 126:95-102.
39. Kohlisch, O.; Schaefer, F. Physiological changes during computer tasks: responses to mental load or to motor demands? *Ergonomics*. 1996, 39: 213-224.
40. Lang, P.J.; Bradley, M.M.; Cuthber, B.N. Emotion, attention, and the startle reflex. *Psychological Review*. 1990, 97: 377-395.
41. Lang, P.J.; Greenwald, M.K.; Bradley, M.M. Looking at pictures: Affective, facial, visceral, and behavioral reactions. *Psychophysiology*. 1993, 30: 261-273.
42. Lang, P.J.; Bradley, M.M.; Cuthber, B.N. Emotion and motivation: measuring affective perception. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 1998, 15: 397-408.
43. Lipp, O.V.; Siddle, D.A.T.; Dall, P.J. Effects of stimulus modality and task condition on blink startle modification and on electrodermal responses. *Psychophysiology*. 1998, 35: 452-461
44. Mehrabian, A.; Russell, J.A. An approach to environmental psychology. *In Cambridge, MA: MIT Press*. 1974.
45. Miller R. C., & Hart, S. G. Assessing the subjective workload of directional orientation tasks. *In Twentieth Annual Conference on Manual Control*. 1984, . 85-95 Washington D.C.:NASA Conference Publication 2341.
46. Moruzzi, G., Magoun H.W., Brain stem reticular formation and activation of the EEG *Electroencephalographic Clinical Neurophysiology*. 1949 1:455-473.
47. Näätänen R., The inverted-U relationship between activation and performance : a critical review. *In S. Kornblum, (ed.), Attention and Performance IV*, 1973, New-York: Academic Press, 155-174.
48. Page, Y. Les conducteurs accidentés révèlent-ils, lors de leurs entretiens avec les équipes accidentologiques, des besoins en information sur la situation routière en cours, qui aurait pu les aider à éviter l'accident ? *Laboratoire d'Accidentologie, de biomécanique et d'études du comportement humain, PSA Peugeot Citroën – Renault, 2000*.
49. Page, Y., Hermitte, T., Évaluation de l'efficacité des systèmes de sécurité embarqués. *PRAC 2010 : Prévention des Risques et Aides à la Conduite, Paris, 4-5 mai 2010*
50. Paillard J., Vers une psychobiologie de l'intentionnalité. In M. Laurent, P. Therme, (eds.), *Recherches en A.P.S. II*. 1987, 163-194.
51. Patterson, A.K. Intelligent cruise control system impact analysis. *Masters thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University*. 1998.
52. Petit C, Capperon S, Roch H, Priez A. Electrodermal responses during driving on a dynamic simulator. *Driving Simulation Conference - Paris – September 2002*.
53. Petit, C.; Flegel, P.; Priez, A.; Collet, C.; Vernet-Maury, E.; Dittmar A. Phasic electrodermal response specificity of drivers during differnt braking situations. *Second International Conference on Psychophysiology in Ergonomics*. Kyoto-Osaka-Nara, Japan; 1998, 124-125.

54. Porges S.W. Orienting in a defensive world: mammalian modifications of our evolutionary heritage. A Polyvagal Theory. *Psychophysiology*, 1995, 32, 301-318.
55. Pribam, K.H. & McGuinness, D. Arousal, activation and effort in the control of attention. *Psychological Review*, 1975, 82 : 116-149.
56. Priez A. & Petit C. Drivers Autonomic nervous activity during emergency braking situations. *Psychophysiology*, 1999, 36 :21.
57. Priez A., Petit C., Brigout C., Tarrière C., Collet C., Vernet-Maury E., Dittmar A., & Delhomme G. Electrodermal characterisation of driver's behaviour. *Second European Conference on Engineering an Medecine – Stuttgart – April 25-28, 1993*.
58. Royet, J.P.; Plailly, J.; Delon-Martin, C.; Kareken, D.A.; Segebarth, C. fMRI of emotional responses to odors: influence of hedonic valence and judgment, handedness, and gender. *NeuroImage*. 2003, 20: 713-728.
59. Russell, J.A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980, 39: 1161-1178.
60. Siddle, D.A.T.; Lipp, O.V.; Dall, P.J. The effects of task type and task requirements on the dissociation of skin conductance responses and secondary task probe reaction time. *Psychophysiology*. 1996, 33, 73-83.
61. Sostek, A.J. Effects of electrodermal lability and payoff instructions on vigilance performance. *Psychophysiology*. 1978, 15: 561-568.
62. Spérandio, J.C., L'Ergonomie du Travail Mental in *Mental Work Ergonomics*, 1988.
63. Steele, K.; Cox, T. Psychological and physiological reactions to visual representations of war. *International Journal of Psychophysiology*. 1986, 3, 237-252.
64. Vermerch, P. L'entretien d'explicitation. *ESF Issy-Les-Moulineaux* :, 2004.
65. Vernet-Maury, E., Deschaumes-Molinaro, C., Delhomme, G., & Dittmar, A. Autonomic nervous system activity and mental workload. In Ullsberger, P. (Ed.), *Psychophysiology of mental workload*, Bundesanstalt für Arbeitmedizin, Berlin, 1993, 42-48.
66. Vernet-Maury, E., Robin, O., Caterini, R., Delhomme, G., & Dittmar, A., Economides, S. Skin potential polarity, predictor index of emotional load. *Homeostasis*,, 1996, 37 : 145-154.
67. Vernet-Maury, E., Robin, O., & Dittmar, A. The Ohmic perturbation duration : An original temporal index to quantify electrodermal response. *Behavioral Brain Research*, 1995, 67 : 103–107.
68. Wickens, C.D. "Processing resources in attention", in R. Parasuraman & D.R. Davies (Eds.), *Varieties of attention*, New York: Academic Press. 1984, 63-102
69. Woodworth, R.S.; Schlosberg, H. In: *Experimental psychology* (3rd revised edition), Holt, Rinehart & Winston, eds. New-York; 1954.
70. Yerkes R.M., Dodson J.D., The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 1908, 18 : 458-482.
71. Youngbin, Y. A focus group study of automated highway systems and related technologies. *Berckley (California) : California PATH Working Paper, Institute of Transport Studies – 1*