



HAL
open science

Analyse du système Conducteur-Véhicule-Environnement par une approche multifactorielle et multivariée

Karine Younsi

► **To cite this version:**

Karine Younsi. Analyse du système Conducteur-Véhicule-Environnement par une approche multifactorielle et multivariée: Application au changement de voie sur réseaux autoroutiers. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009. Français. NNT : 2010VALE0005 . tel-03003349

HAL Id: tel-03003349

<https://uphf.hal.science/tel-03003349>

Submitted on 13 Nov 2020

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.

THÈSE

Présentée à

l'Université de Valenciennes
et du Hainaut Cambrésis

Pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité

AUTOMATIQUE INDUSTRIELLE ET HUMAINE

Par

Karine YOUNSI
Ingénieur ENSIAME

Analyse du système Conducteur-Véhicule-Environnement
par une approche multifactorielle et multivariée.

Application au changement de voie sur réseaux autoroutiers.

Soutenue le 20 janvier 2009 à Valenciennes devant la commission d'examen :

Mme Sylvie Charbonnier
M. Ali Charara
M. Stéphane Espié
M. Denis Hamad
M. Moamar Sayed Mouchaweh
M. Philippe Simon
M. Pierre Loslever
M. Jean-Christophe Popieul

Rapporteur
Rapporteur

Co-directeur
Co-directeur

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes au sein de l'équipe Système Homme-Machine (SHM) dirigée par le Professeur Frédéric Vanderhaegen. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour m'avoir accueillie dans son équipe.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes directeurs de thèse, le Professeur Jean-Christophe Popieul et le Professeur Pierre Loslever, pour m'avoir apporté leurs précieux conseils et leurs savoirs, mais aussi pour m'avoir encouragée tout au long de ce travail.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Bako Rajaonah de l'équipe PERCOTEC pour son soutien et ses nombreux conseils en psychologie cognitive.

Je voudrais également remercier Philippe Simon et Jérôme Floris sans qui les expérimentations n'auraient jamais vu le jour.

Merci à Jannick Naveteur pour m'avoir fait partager son savoir en mesures physiologiques.

Mes remerciements s'adressent également à Sylvie Charbonnier et Ali Charara de m'avoir fait l'honneur de rapporter les résultats de mes travaux, ainsi qu'à Stéphane Espié, Denis Hamad et Moamar Sayed Mouchaweh d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je tiens à remercier la Région Nord-Pas de Calais ainsi que le Centre National de la Recherche Scientifique de m'avoir offert la possibilité de réaliser ce travail en me finançant.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toute l'équipe SHM et plus particulièrement à Julien Rudent, Delphine Dubart, Ludovic Duquesne, Bruno Laurent, Jean-Marc Girard.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I ETAT DE L'ART	5
1 INTRODUCTION	5
2 CONDUITE AUTOMOBILE : ETUDIER POUR MIEUX COMPRENDRE	5
2.1 L'INSECURITE ROUTIERE	5
2.2 ACTIONS ENTREPRISES	6
2.2.1 <i>Actions des pouvoirs publics</i>	6
2.2.2 <i>Actions des constructeurs automobiles</i>	7
2.3 LE SYSTEME CONDUCTEUR – VEHICULE – ENVIRONNEMENT	9
2.3.1 <i>L'homme</i>	10
2.3.2 <i>Le véhicule</i>	12
2.3.3 <i>L'environnement</i>	12
2.4 SYNTHESE	13
3 PRINCIPAUX FACTEURS ETUDIES EN CONDUITE AUTOMOBILE	13
3.1 FACTEURS LIES AU CONDUCTEUR.....	14
3.2 FACTEURS LIES AU VEHICULE	17
3.3 FACTEURS LIES A L'ENVIRONNEMENT	20
3.4 SYNTHESE	23
4 CAS DU CHANGEMENT DE VOIE.....	24
4.1 FACTEURS LIES AU CONDUCTEUR.....	24
4.2 FACTEURS LIES AU VEHICULE	26
4.3 FACTEURS LIES A L'ENVIRONNEMENT	27
4.4 AUTRES ETUDES	29
4.5 SYNTHESE	35
5 CONCLUSION	36
II METHODES D'EXPLOITATION DES DONNEES	39
1 INTRODUCTION	39
2 NOTATIONS	39
3 L'ETUDE EMPIRIQUE	40
3.1 OBJECTIFS	40
3.2 DIFFERENTES ETAPES DE L'ETUDE EMPIRIQUE	40
4 L'ANALYSE STATISTIQUE	41
4.1 CARACTERISATION DES DONNEES	42
4.1.1 <i>Vérification et filtrage des données</i>	42
4.1.2 <i>Construction de nouvelles variables temporelles et d'indicateurs</i>	43
4.2 CODAGE DES DONNEES	44
4.3 MISE EN FORME DES DONNEES	44
4.4 ANALYSE DES RELATIONS OU DES CLASSES	45
4.5 PRESENTATION DES RESULTATS.....	47
5 LA CARACTERISATION FONDEE SUR UN DECOUPAGE SPATIO-TEMPOREL	47
5.1 CARACTERISATION	47

5.1.1	<i>Découpage temporel</i>	48
5.1.2	<i>Découpage spatial</i>	49
5.1.3	<i>Découpage spatio-temporel</i>	50
5.2	MISE EN FORME.....	51
5.3	ANALYSE DES RELATIONS OU DES CLASSES.....	55
6	OUTILS INFORMATIQUES ET STATISTIQUES	56
7	CONCLUSION	58
III	EXPERIMENTATION	61
1	INTRODUCTION	61
2	ASPECTS TECHNIQUES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL	61
2.1	L'ENVIRONNEMENT MATERIEL.....	62
2.2	LE PARCOURS EXPERIMENTAL.....	65
2.2.1	<i>Les situations expérimentales</i>	65
2.2.2	<i>Le parcours</i>	67
2.3	LES DONNEES RECUEILLIES.....	67
2.3.1	<i>Mesures directes</i>	67
2.3.2	<i>Questionnaires</i>	70
2.3.3	<i>Le recueil vidéo</i>	70
2.4	LE DEROULEMENT D'UNE PASSATION (FIGURE 25).....	71
2.4.1	<i>Accueil du participant</i>	71
2.4.2	<i>Pose des équipements physiologiques</i>	71
2.4.3	<i>Phase de repos</i>	71
2.4.4	<i>Familiarisation</i>	72
2.4.5	<i>Passation des scénarii</i>	72
2.4.6	<i>Fin de l'expérimentation</i>	72
2.5	POPULATION.....	73
3	PRESENTATION DES DONNEES INITIALEMENT ENREGISTREES	74
4	CARACTERISATION DES DONNEES	75
4.1	CELLULES DE H ₀	75
4.2	DONNEES SUPPRIMEES.....	76
4.3	FILTRAGE ET RE-ECHANTILLONNAGE.....	77
4.4	CALCUL DE NOUVELLES VARIABLES.....	78
5	CONCLUSION	79
IV	ANALYSE DE DONNEES	83
1	INTRODUCTION	83
2	ETAPE 1 : CARACTERISATION SPATIO-TEMPORELLE	83
2.1	DECOUPAGE TEMPOREL.....	83
2.2	DECOUPAGE SPATIAL.....	88
2.3	COMBINAISON DES SEGMENTATIONS TEMPORELLE ET SPATIALE.....	91
3	ETAPE 2 : CODAGE DES DONNEES	91
4	ETAPE 3 : MISE EN FORME DES DONNEES	92
5	ETAPE 4 : ANALYSE DES TABLEAUX	92
5.1	ETUDE DES AXES 1 ET 2.....	93
5.1.1	<i>Points en actifs</i>	93
5.1.2	<i>Points en illustratif</i>	98
5.2	ETUDE DES AXES 3 ET 4.....	102
6	ETAPE 5 : PRESENTATION DES RESULTATS	102

6.1	TENDANCE GENERALE	103
6.1.1	<i>Gestion de l'accélération du véhicule lors des différentes phases d'un dépassement ..</i>	<i>103</i>
6.1.2	<i>Gestion du clignotant lors du dépassement</i>	<i>106</i>
6.2	INFLUENCE DU FACTEUR SITUATION	108
6.3	INFLUENCE DU FACTEUR INDIVIDU	110
7	CONCLUSION	114
V	BILAN ET PERSPECTIVES	117
1	INTRODUCTION	117
2	BILAN	117
2.1	DEMARCHE	117
2.2	RESULTATS DE L'ANALYSE DESCRIPTIVE MFMV	119
2.3	VERS UNE ANALYSE CONFIRMATOIRE	120
3	PERSPECTIVES DE TRAVAIL	123
4	CONCLUSION	128
	CONCLUSION GENERALE	131
	PUBLICATIONS	136
	BIBLIOGRAPHIE	138
	LISTE DES FIGURES	146
	ANNEXE : ETUDE DES AXES 3 ET 4.....	150
	ANNEXE : ANALYSE DE SP.	154

Glossaire

AACC	Auto-adaptive Cruise Control
ABS	Anti-Blocage Système
ACC	Adaptive Cruise Control
ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACP	Analyse en Composantes Principales
AFU	Aide au Freinage d'Urgence
ARCOS	Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée
c	Colonne du tableau
\mathbb{E}	Ensemble \mathbb{E}
E	Taille de l'ensemble \mathbb{E}
e	Terme générique de l'ensemble \mathbb{E} ($e=1, \dots, E$)
ESP	Electronic Stability Program
FS	Fenêtre Spatiale
FT	Fenêtre Temporelle
GPS	Global Positioning System
i	Facteur individu
j	Nombre de véhicules du trafic
k	Modalités des véhicules du trafic
LAMIH	Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines
LCE	Lane Change emergency
MFMV	MultiFactoriel et MultiVarié
OIS	Outils Informatiques et Statistiques
ONISR	Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière
PREDIT	Programme pour la Recherche, le Développement et l'Innovation dans les Transports terrestres
r	Ligne du tableau
SCVE	Système Conducteur-Véhicule-Environnement
SGBD	Systèmes de Gestion de Base de Données
SHM	Système Homme-Machine
SMV	Space Membership Values
STMV	Space-Time Membership Values
t	Facteur temps

TIV	Temps Inter-Véhiculaire
TLC	Time to Line-Crossing
TMV	Time Membership Values
TTC	Time To Collision
U	Variables expérimentées
U'	Variables contrôlées non expérimentées
U''	Variables non contrôlées
V	Variables mesurées
VS	Véhicule Sujet
VT1	Véhicule du trafic n°1 placé devant VS
VT2	Véhicule du trafic n°2 placé derrière VS
VT3	Véhicule du trafic n°3 censé empêcher VS lors de la manœuvre
X	Vecteur, matrice ou tableau

Introduction générale

Aujourd'hui encore se pose le problème de la sécurité routière. Même si la répression est de plus en plus sévère et les systèmes d'aide au conducteur de plus en plus perfectionnés, le nombre d'accidents et de tués chaque année reste particulièrement élevé. De nombreuses situations de conduite sont cause d'accidents graves. Parmi celles-ci, la manœuvre de dépassement peut s'avérer particulièrement dangereuse du fait des problèmes d'angles morts et de la vitesse élevée si le conducteur est sur l'autoroute. De nouveaux systèmes d'aide ont vu le jour pour aider le conducteur lors de la prise de décision dans cette situation. Ceux-ci visent principalement à apporter des informations supplémentaires au conducteur au moyen de caméras, de radars et autres capteurs. Cependant ces systèmes techniques ne tiennent généralement pas compte de l'aspect humain, aspect qu'il est indispensable de considérer sitôt que l'on modifie la tâche de conduite. Les causes en sont principalement un manque de méthodes et d'outils pour réaliser les études nécessaires à cette prise en compte. Ainsi, notre but n'est pas de développer un nouveau système d'aide mais de proposer une méthode répondant à ce besoin et de l'appliquer pour mieux comprendre la façon dont le conducteur procède à un dépassement.

En effet, l'étude des systèmes à composante humaine et plus particulièrement du système Conducteur-Véhicule-Environnement passe très souvent par l'exploitation d'une grande base de données comprenant plusieurs facteurs (dont au moins le facteur individu et le facteur temps) et plusieurs variables. De plus, les facteurs et les variables peuvent appartenir à des échelles mathématiques différentes : les données peuvent être qualitatives (échelle nominale (par exemple le sexe) ou échelle ordinale (par exemple une opinion plus ou moins favorable)), ou quantitatives (échelle d'intervalle par exemple la température ou échelle de rapport par exemple la vitesse d'un véhicule). Une question se pose donc : comment analyser une telle base de données en gardant l'aspect MultiFactoriel et MultiVarié (MFMV)?

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie essayant de répondre à cette problématique, car le plus souvent, les chercheurs résument plus ou moins fortement les données dans la mesure où conserver l'aspect MFMV le plus longtemps possible dans la démarche d'analyse est compliqué. Le but de cette méthodologie est dans un premier temps

d'étudier les tendances générales de la base de données et de mettre en évidence les relations entre les variables et les relations entre les facteurs et les variables.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre présente tout d'abord l'insécurité routière et les moyens mis en œuvre par les pouvoirs publics et les constructeurs automobiles pour la diminuer. Ensuite, il aborde l'étude du conducteur dans son environnement de conduite afin de mieux comprendre les facteurs qui le conduisent à un accident. Cette étude sera illustrée par quelques exemples généraux de la conduite automobile. Ensuite, nous nous focaliserons sur la situation du changement de voie.

Le deuxième chapitre présente de manière générale les différentes étapes de l'analyse d'une base de données MFMV. Pour chacune de ces étapes, différentes méthodes sont possibles. Un panorama de ces méthodes est tout d'abord présenté puis l'une de ces méthodes est retenue. La méthode retenue pour la première phase de l'analyse statistique (étape de caractérisation), c'est-à-dire le découpage spatio-temporel, est ensuite décrite de manière détaillée. Enfin, les différents logiciels permettant d'exploiter une telle base de données sont présentés.

Pour illustrer la méthode choisie dans le chapitre 2, disposer d'une base de données empiriques semble nécessaire. Toutes les étapes conduisant à ce recueil de données seront expliquées et feront l'objet du chapitre III. Ce chapitre décrit une expérience visant à mieux comprendre les mécanismes de dépassement et menée sur le simulateur du LAMIH. Ce chapitre III comprendra également les premières phases de l'étape de caractérisation des données. La base de données initiale subira plusieurs transformations comme par exemple la création de nouveaux indicateurs pour les besoins de l'analyse.

Le quatrième chapitre est consacré à la mise en pratique de la méthodologie décrite dans le chapitre 2 dans le contexte de la conduite automobile. Il débute par le découpage spatio-temporel. Cette étape est très importante puisqu'elle va conditionner les résultats de l'analyse. Ensuite, les autres étapes de l'analyse seront expliquées. L'analyse repose essentiellement sur les méthodes descriptives pour ne pas faire d'hypothèses a priori sur les données et pour mettre en évidence les tendances tout en gardant l'aspect MFMV. L'approche statistique est alors essentiellement articulée autour de l'Analyse des Correspondances

Multiple. Ses sorties étant relativement complexes, un soin particulier est accordé à la présentation des résultats sous forme de graphiques plus explicites.

Le dernier chapitre propose un bilan, du point de vue des objectifs, de la méthodologie ainsi que des résultats obtenus. Un prolongement de l'analyse descriptive MFMV par une analyse inférentielle est notamment suggéré. Une discussion sera présentée concernant l'expérimentation réalisée, le choix du chemin d'analyse retenu et des résultats dans le cas des situations de changement de voies. Puis, des perspectives de recherche seront proposées pour améliorer le recueil de données et pour affiner les résultats précédents.

I Etat de l'art

1 Introduction

Conduire est une tâche complexe à laquelle sont confrontés quotidiennement une grande partie des habitants des pays développés. Cette tâche est caractérisée par un risque élevé dans la mesure où elle entraîne un nombre important de décès chaque année. Une des situations particulièrement dangereuse est le changement de voie sur les réseaux autoroutiers, qui était la cause de près de 30% d'accidents corporels et de 14% de tués en 2005 [ONISR, 2005]. Ceci pour deux raisons : la vitesse élevée qui caractérise la circulation sur autoroute et également souvent le manque de visibilité. Quelques constructeurs ont essayé d'apporter des solutions à ce problème en intégrant des systèmes d'aide au dépassement dans le véhicule comme par exemple les sociétés Hella ou Valeo, qui préviennent le conducteur en faisant clignoter un voyant quand un véhicule arrivant par l'arrière serait susceptible de le gêner s'il souhaitait dépasser. Ce système fonctionne en permanence même si le conducteur ne souhaite pas commencer une manœuvre, ce qui lui amène une source d'information superflue. Ne serait-il pas possible d'améliorer ces systèmes en le prévenant par exemple uniquement quand il compte effectuer une manœuvre ?

Ce chapitre aborde de façon détaillée la présentation du contexte de ce travail. Il s'articule en trois parties. Dans la première partie, nous verrons pourquoi il est important d'étudier le système conducteur-véhicule-environnement. Dans la seconde partie, nous donnerons quelques exemples de facteurs étudiés en conduite automobile et nous choisirons d'étudier une situation en particulier : le changement de voie, ce qui fera l'objet de notre troisième partie.

2 Conduite automobile : Etudier pour mieux comprendre

2.1 *L'insécurité routière*

L'Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR) édite chaque année un document d'information permettant de connaître l'évolution des accidents de la route en France. Sur une longue période, entre 1975 et 2001, la baisse annuelle moyenne du nombre des personnes tuées s'établissait à 2,3 %.

Depuis 2001, on a constaté une accélération du processus avec des baisses successives de

- 6,2 % en 2002,
- 20,9 % en 2003,
- 8,7 % en 2004,
- 4,9 % en 2005,
- 11,6% en 2006,
- 2% en 2007,
- 7,5% en 2008 avec encore 4 274 personnes tués.

Ce chiffre est encore trop élevé même s'il tend à diminuer chaque année. C'est pour cela que le gouvernement français a renforcé sa politique de sécurité routière, on peut citer par exemple le projet ARCOS (Action de Recherche pour une CONduite Sécurisée). Ce projet s'inscrit dans le cadre des actions fédératives du PREDIT (Programme pour la Recherche, le Développement et l'Innovation dans les Transports terrestres) qui concerne l'amélioration de la sécurité routière, avec un objectif à terme de réduction des accidents de 30% [Tricot 2005]. Quels sont les moyens mis en œuvre pour réduire cette insécurité ?

2.2 Actions entreprises

2.2.1 Actions des pouvoirs publics

Afin de diminuer cette insécurité, le gouvernement a débuté son action par la mise en place de mesures préventives en renforçant la réglementation (figure 1). Ces mesures se sont étalées dans le temps, par exemple en 1979, la ceinture du conducteur devient obligatoire en agglomération et en 1995 le taux maximum d'alcoolémie toléré est ramené à 0.5 g/l.

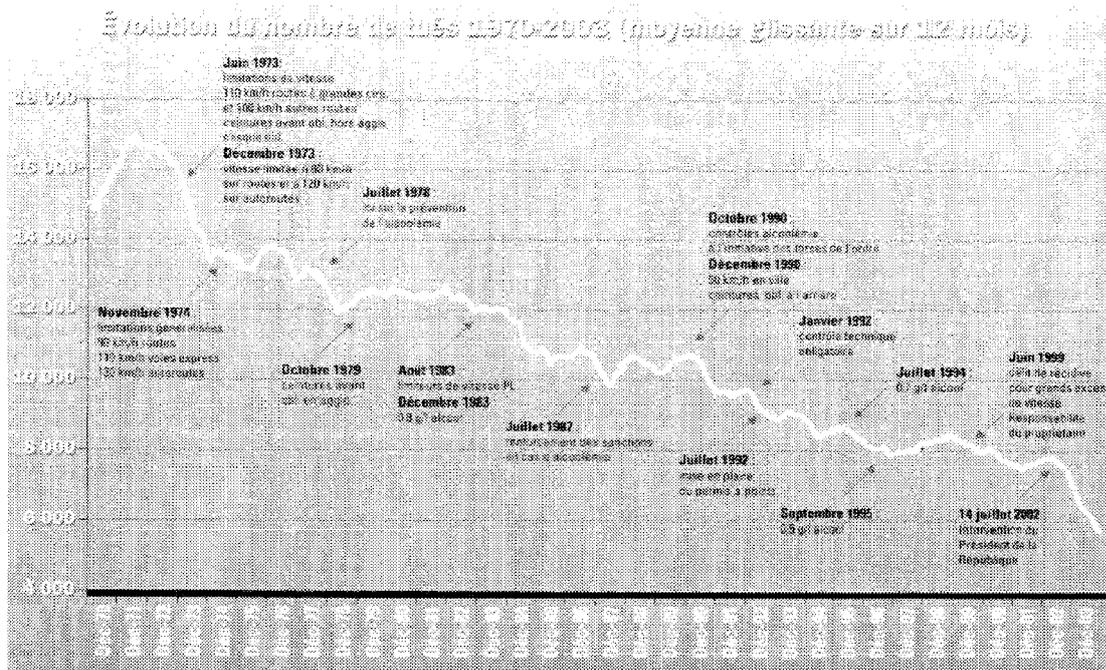


Figure 1 : Evolution du nombre de tués en regard de celle de la réglementation de 1970 à 2003 [Bouslimi, 2006].

Ces efforts n'étant pas suffisants pour diminuer considérablement l'insécurité routière, la politique gouvernementale s'est orientée vers deux autres points : les campagnes d'information et de prévention ainsi que la répression. Ces campagnes fortes et choquantes pour sensibiliser le conducteur sur les risques de la route sont apparues il y a quelques années. Il s'agit souvent de spots publicitaires de quelques secondes montrant des situations mortelles et pour lesquelles les facteurs liés aux accidents les plus fréquents sont évoqués comme, par exemple, la vitesse ou l'alcool au volant. Les campagnes ne semblant pas avoir suffi à faire prendre conscience de la dangerosité des comportements irresponsables sur les routes, l'action des pouvoirs publics s'est alors orientée vers une politique de plus forte répression par un renforcement des contrôles et des sanctions pénales comme par exemple la mise en place de radars automatiques pour obliger les conducteurs à respecter les vitesses ou l'accroissement du nombre de points retirés à chaque infraction.

2.2.2 Actions des constructeurs automobiles

Aux actions des pouvoirs publics viennent s'ajouter celles des constructeurs automobiles.

Au tout début, leur effort était concentré sur la sécurité passive (partie droite de la figure 2), c'est-à-dire protéger et secourir le conducteur quand le crash a eu lieu. Les ceintures

de sécurité, les airbags, les coques à déformation progressive ... en sont des exemples classiques. Malheureusement l'efficacité de ces systèmes est limitée par les lois de la physique des solides, et lorsque l'on souhaite améliorer encore la sécurité il convient de s'intéresser à la prévention de la collision plutôt qu'à la seule minimisation de ses conséquences. Les progrès réalisés en matière d'informatique embarquée mais aussi de capteurs et d'actionneurs ont permis aux constructeurs automobiles d'étendre leurs recherches à la sécurité active.

Le but de la sécurité active (partie gauche de la figure 2) est d'anticiper au maximum sur une collision potentielle. Elle vise tout d'abord à informer et alerter le conducteur de situations dangereuses, et éventuellement ensuite à l'assister puis à agir sur le véhicule, tout ceci afin d'éviter un crash. Pour l'instant, la plupart des efforts ont été faits, soit pour assister le conducteur comme c'est le cas avec l'ABS, l'ESP et l'ACC; soit pour agir sur le véhicule lorsque le conducteur ne peut plus rien faire comme c'est le cas avec l'AFU. Plus tôt le conducteur est alerté, et plus grandes sont les chances d'éviter le crash. La majeure partie du travail devra donc être orientée le plus possible en amont en informant et en alertant le conducteur de situations potentiellement dangereuses. Pour effectuer ce travail, nous allons tout d'abord décrire ce qu'est le SCVE et, pour chaque élément de ce système, les facteurs qui pourraient être étudiés pour apporter des informations aidant à la conception des futurs systèmes d'aides.

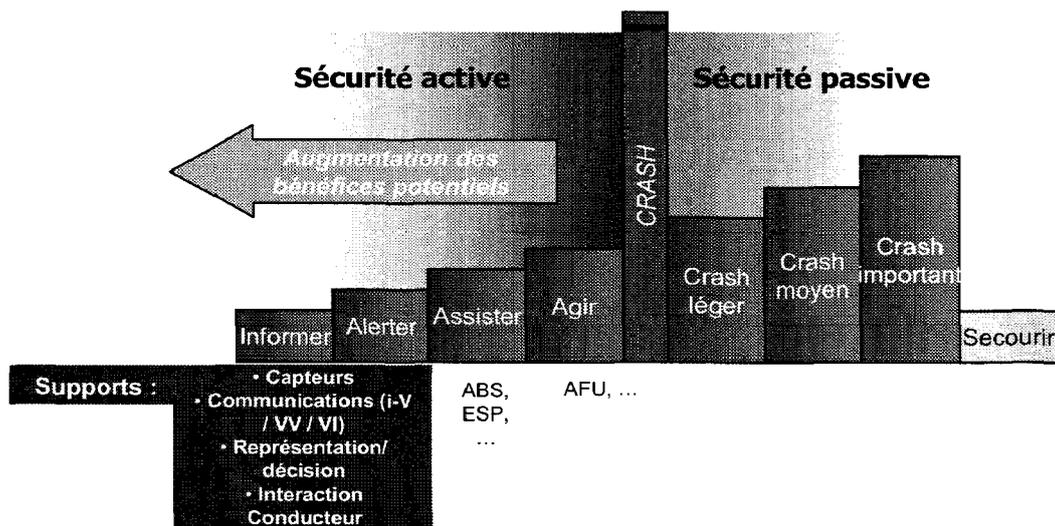


Figure 2 : Sécurité active vs sécurité passive.

2.3 Le système conducteur – véhicule – environnement

La conduite automobile est l'activité du conducteur au sein du système conducteur - véhicule dans l'environnement routier. Cette activité vise à répondre à un objectif principal qui est d'effectuer un déplacement dans un environnement en évolution constante. Cet objectif est orienté par des sous-objectifs que le conducteur s'est assigné (rapidité, sécurité, facilité ...) et est soumis à certaines règles explicites et implicites (code de la route, savoir vivre...) [Perron, 1997].

L'activité de conduite automobile est une activité considérée comme complexe et peu structurée. Elle place le conducteur dans des situations très diverses qui exigent une adaptation continue dans un environnement caractérisé par une gestion d'interactions multiples réalisée sous fortes contraintes temporelles. C'est de plus une activité particulière dans le contexte des systèmes Homme - machine : l'opérateur humain qui y est impliqué est dans la boucle de contrôle-commande et n'est donc pas un simple superviseur agissant seulement lors d'un fonctionnement dégradé [Riera, 1993].

L'homme, le véhicule et l'environnement sont des éléments indissociables dans toute étude de la conduite. En effet, le conducteur prélève en permanence des informations provenant de l'environnement pour décider et agir sur son véhicule (figure 3) [Todoskoff, 1999].

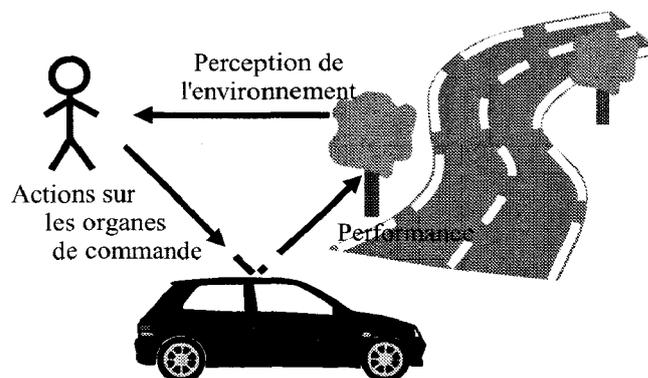


Figure 3 : Le schéma du SCVE.

Dans ce système, l'une de ces trois composantes peut être à l'origine d'un dysfonctionnement, soit de façon directe, soit au travers de ses interactions avec les deux autres composantes, interactions qui sont à l'origine de la difficulté de l'étude.

Chacune des trois composantes est décrite ci-dessous.

2.3.1 L'homme

Une grosse part de travail pour améliorer la connaissance du SCVE a été consacrée à la proposition de modèles de comportement du conducteur susceptibles de décrire et/ou expliquer les processus qui sont à l'origine des accidents de la route afin de proposer des paradigmes ([Gibson, 1938], [Allen, 1971], [Wilde, 1982], [Fuller, 1984], [Michon, 1985], [Van Der Molen et Botticher, 1987]). [Badr, 1991], [Tricot, 2001] et [Brissart, 2004] en présentent une revue détaillée. Si ces modèles ont des structures différentes (modèles basés sur la gestion de grandeurs physiques, la gestion du risque, le fonctionnement cognitif de l'opérateur...), il n'en demeure pas moins qu'un certain nombre d'éléments de consensus s'en dégagent.

Le premier élément commun à ces différents modèles est la structuration hiérarchique de la tâche de conduite. Généralement tirée du modèle d'Allen [Allen, 1971], cette structure hiérarchique décompose la tâche en trois niveaux en s'appuyant sur deux critères : la durée nécessaire pour l'accomplissement de la sous-tâche et le niveau de conscience qu'implique la manifestation et la réalisation de la sous-tâche, par analogie avec le modèle cognitif d'opérateur proposé par [Rasmussen, 1983] qui repose sur les 3 niveaux suivants :

- le niveau stratégique ou de navigation correspondant à la manière dont le conducteur planifie son trajet,
- le niveau tactique ou de guidance se résumant à la gestion de la trajectoire dans l'environnement routier (suivi de véhicules, dépassements, prise d'intersections, ...),
- le niveau opérationnel ou de contrôle qui consiste à réguler la position latérale et la vitesse.

Le deuxième élément commun est le phénomène de compensation. Ce phénomène est caractérisé par le fait que les conducteurs modifient leur comportement sur le moyen terme de façon à l'adapter à une perception du risque de la situation : principe de l'homéostasie du risque énoncé par [Wilde, 1982]. Ainsi, les améliorations apportées aux véhicules ou à l'infrastructure seraient en partie contrebalancées par une modification du comportement des conducteurs : un accroissement de la prise de risque qui en élimine ainsi une grande partie de l'efficacité.

Le troisième élément commun est la considération de la tâche de conduite comme un processus général de traitement de l'information (perception - cognition - action). Cette

approche met en évidence le rôle primordial qui est joué par la perception des informations en conduite automobile.

De ces considérations, deux formes de modèles se dégagent : les modèles de la psychologie cognitive et les modèles de l'automatique. Les premiers sont des modèles descriptifs utilisés pour représenter les comportements globaux des conducteurs, en intégrant des mécanismes complexes tels que la capacité à apprendre, à anticiper, à faire des erreurs inhérentes à l'opérateur humain. Les seconds sont principalement des modèles décrivant de façon locale certains mécanismes de régulation comme le guidage longitudinal ou le guidage latéral. Ils ne couvrent en général que le niveau opérationnel et parfois une partie du niveau tactique dans des conditions d'environnement bien déterminées.

Ces différents modèles sont peu adaptés pour le développement de systèmes d'assistance embarqués dans le véhicule, soit parce qu'ils sont trop généraux pour pouvoir être utilisés pour simuler le comportement du conducteur (cas des modèles de la psychologie cognitive) soit parce qu'ils sont trop spécifiques à certaines phases très limitées de la tâche de conduite (cas des modèles de l'automatique).

A titre d'exemple, [Wickens, 1992] modélise l'être humain comme indiqué dans la figure 4. Même si ce modèle peut s'appliquer à n'importe quel individu, il met en évidence que la majorité des paramètres du modèle dépendent de l'individu réalisant la tâche. Ainsi, l'étude du SCVE doit impérativement tenir compte des différences inter et intra individuelles des conducteurs.

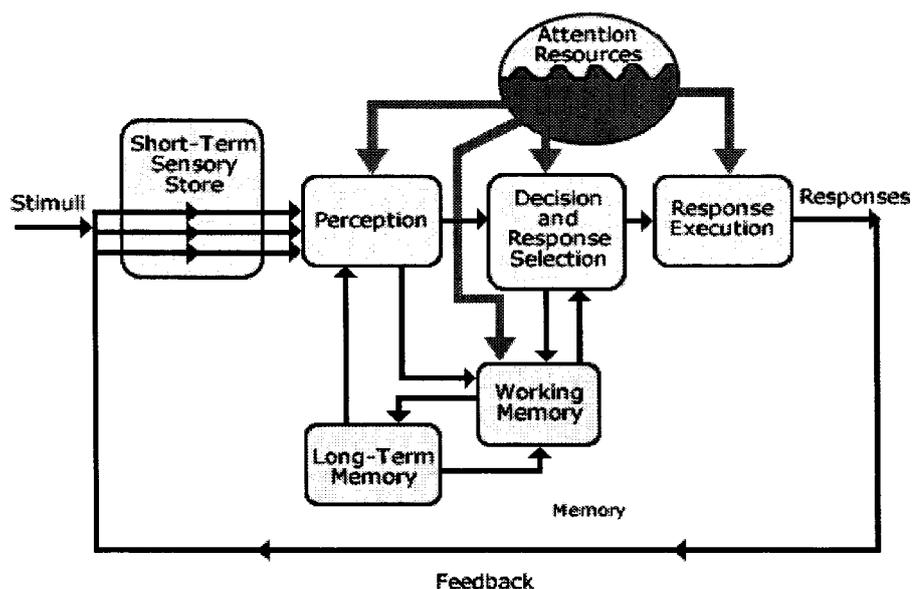


Figure 4 : Modèle de Wickens. [Wickens, 1992]

Les caractéristiques du conducteur (différences inter-individuelles)

Les différences inter-individuelles existent du fait que chaque conducteur a une spécificité propre. L'étude du comportement ne peut donc se faire sans considérer différents facteurs liés à ces différences, facteurs qui peuvent être le sexe, l'âge, l'expérience de conduite, le tempérament de conduite, la familiarité du trajet, etc.

L'état interne du conducteur (différences intra-individuelles)

L'état physiologique et psychologique du conducteur évolue constamment dans le temps. Cette évolution peut être induite par le stress, la motivation, la fatigue, les émotions, la consommation de médicaments, de drogues, etc.

Les variations de l'environnement amènent aussi le conducteur à modifier son activité de conduite.

2.3.2 Le véhicule

Les caractéristiques du véhicule

Le conducteur est amené à adapter sa conduite à son véhicule puisque, d'une part les aspects techniques et dynamiques sont différents d'un véhicule à un autre, et d'autre part l'état du véhicule (usure des pneus, du moteur, des freins...) évolue dans le temps.

Les interactions avec le véhicule

Le « dialogue » entre le conducteur et le véhicule peut être aussi source de modification de son comportement de conduite, notamment en ce qui concerne l'introduction de systèmes d'aides (ABS, ESP, GPS...) ou de systèmes assurant le confort du conducteur (téléphone portable...).

2.3.3 L'environnement

L'environnement routier

L'environnement routier est constitué par la combinaison de différents éléments dont les principaux sont :

- La géométrie de la route (courbure du tracé en plan, altimétrie, largeur de la chaussée...) qui a une conséquence directe sur le comportement du conducteur, par exemple, le conducteur diminue sa vitesse en virage pour garder le contrôle du véhicule.

- Le type de revêtement de la chaussée (routes goudronnées, pavées, ...) qui induit des différences d'adhérence et de vibrations au niveau de la maîtrise du véhicule.
- Les interactions avec les autres usagers de la route qui nécessitent une grande attention de la part du conducteur comme la densité de trafic, le comportement des autres usagers, la catégorie du véhicule en interaction...
- Les conditions climatiques et d'éclairage qui modifient le comportement de conduite en fonction des variations de l'adhérence de la chaussée (pluie, verglas...) et de la visibilité du conducteur (brouillard, nuit...)

Le contexte routier

Les informations liées au contexte routier jouent un rôle décisif dans la conduite au niveau de la perception par le conducteur du danger, des distances, des vitesses... Ces informations peuvent provenir de l'environnement immédiat (signalisation verticale et horizontale, éléments situés sur le bord de la route...) ou de l'environnement au sens large, c'est-à-dire la topographie de la route (montagne, plaine...) et l'infrastructure routière (tunnel, pont...) dans lequel se trouve le conducteur. Toutes ces informations demandent de la part du conducteur des actions sur les commandes du véhicule.

2.4 Synthèse

Dans cette partie, nous avons d'abord évoqué le problème de la sécurité routière et les actions qui ont été entreprises pour réduire l'insécurité. Dans le but d'aider au mieux le conducteur afin de lui éviter un accident, il faut pouvoir l'informer et l'alerter le plus rapidement possible. Dans ce but, nous avons ensuite présenté le système conducteur – véhicule – environnement ainsi que les facteurs qui pourraient être étudiés en relation avec la problématique de la sécurité routière. Dans les paragraphes suivants, chacun de ces facteurs sera illustré avec des exemples issus de la conduite automobile.

3 Principaux facteurs étudiés en conduite automobile

Cette partie fait un rapide tour de la littérature sur les différents facteurs qui ont été étudiés en conduite automobile. Chacune de ces études propose des éléments de réponses, soit pour prendre des mesures préventives (par exemple, les jeunes conducteurs doivent réduire leur vitesse sur les routes à vitesses élevées), soit pour construire de nouveaux systèmes

d'aide (par exemple, une étude sur l'ACC). Voici quelques exemples pour chacun de ces facteurs. Chacune de ces études peut être modélisée d'après le schéma générique présenté figure 5. Les entrées du système sont les facteurs qui peuvent être expérimentés (exemple : vitesse du véhicule qui précède), contrôlés non expérimentés (exemple : âge) ou non contrôlés (exemple : motivation ou état de fatigue). Les sorties du système sont les variables mesurées (exemple : vitesse du véhicule du participant). Deux objectifs peuvent être atteints (l'influence des facteurs sur les variables ou les relations entre les variables) par deux types de méthodes statistiques : une approche descriptive ou inférentielle.

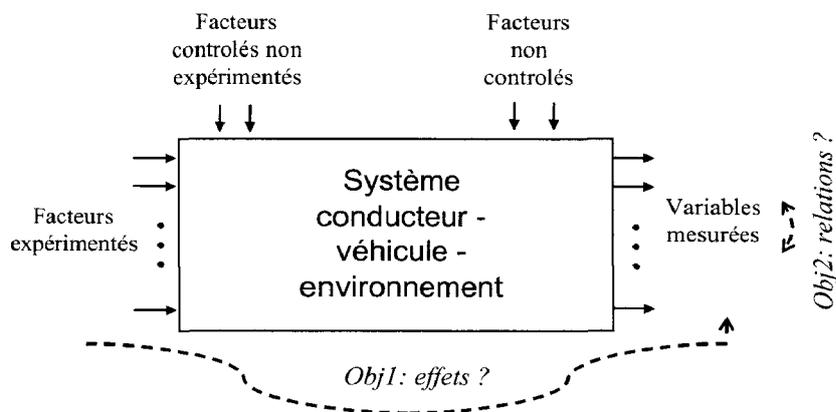


Figure 5 : Relation entre les facteurs et les variables. [Loslever *et al*, 1997]

Du fait du grand nombre d'études existantes, chaque exemple sera présenté succinctement. Pour une lecture plus simple, si une étude fait intervenir plus d'un facteur, un seul facteur sera choisi et expliqué.

3.1 Facteurs liés au conducteur

Age

[Bao et Boyle, 2008] étudient l'influence de l'âge sur le champ de vision des conducteurs. Pour cela, ils recrutent 60 personnes de tranches d'âges différents : 18-25 ans, 35-55 ans et 65-80 ans. Ces personnes doivent, sur route réelle, effectuer trois types de manœuvres (tourner à droite, à gauche et franchir l'intersection) sur différentes intersections de routes à grande vitesse dont les fréquences d'accidents sont différentes. Ils utilisent les méthodes de tests d'hypothèse pour démontrer qu'il existe une différence au niveau de la fréquence des coups d'œil et du contrôle dans les trois rétroviseurs suivant la classe d'âge (Figure 6). Par exemple, les personnes plus âgées regardent moins dans les rétroviseurs droite et gauche.

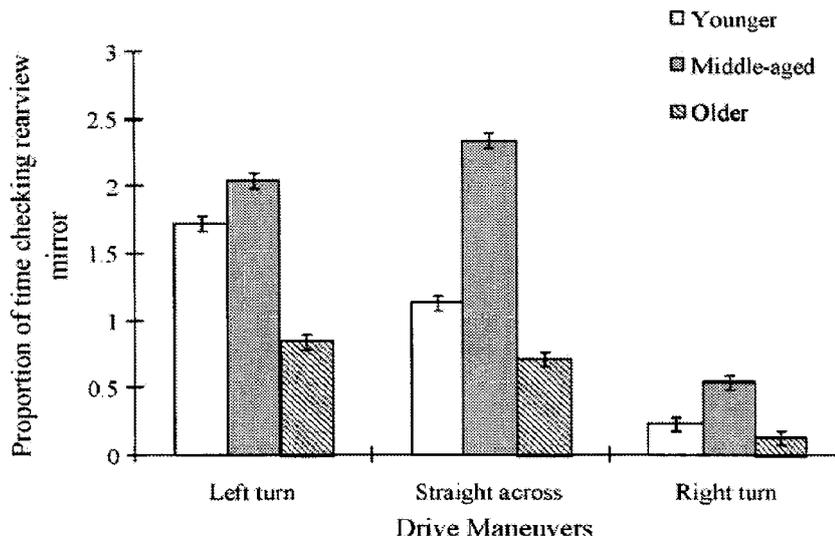


Figure 6 : Fréquence des coups d'œil dans les rétroviseurs suivant la classe d'âge et le type de manœuvres. [Bao et Boyle, 2008]

[Hatfield et Fernandes, 2008] concentrent leurs efforts sur l'étude du comportement des jeunes conducteurs, population la plus impliquée dans les accidents d'après les statistiques. Un échantillon de 89 participants de 16 à 25 ans et 110 participants de plus de 35 ans ont rempli un questionnaire sur l'aversion du risque, la motivation d'un comportement à risque et la perception du risque. Les questionnaires ont été analysés à l'aide de méthodes de tests statistiques et ont globalement révélé que les jeunes conducteurs avaient tendance à prendre plus de risque que les plus âgés comme par exemple en conduisant vite ou sous l'effet de l'alcool.

Sexe

[Fredette *et al.*, 2008] étudient l'influence du sexe dans les accidents de la route faisant intervenir deux véhicules à l'exception des vélos, des cyclomoteurs et des véhicules tout-terrain. Pour cela, ils ont étudié les rapports de police canadiens sur une durée de neuf années. En utilisant les méthodes inférentielles, ils ont pu montrer que les hommes avaient 23% de probabilités de plus que les femmes de mourir dans un accident alors qu'ils avaient 10% de probabilités en moins d'être grièvement blessés ou hospitalisés.

Charge de travail

[Horrey et Lesch, 2008] étudient la charge mentale des conducteurs lorsque ces derniers utilisent des systèmes embarqués. Ils ont demandé à 20 personnes âgées de 25 à 55 ans de conduire sur simulateur en effectuant des tâches ajoutées. Les conditions de route et de

trafic étaient variées : virages, routes serrées, beaucoup de trafic... Les tâches ajoutées étaient de deux types : d'une part, auditive comme par exemple une conversation téléphonique, d'autre part, visuelle comme lire un texte ou utiliser un système de navigation. L'objectif de cette étude était d'évaluer la stratégie du conducteur face à une augmentation de la charge de travail à l'aide de données objectives. En effet, un score était attribué en fonction de la performance aux tâches ajoutées. L'utilisation de méthodes de tests statistiques a montré que la stratégie employée n'était pas forcément adaptée à la situation comme par exemple décrocher le téléphone en arrivant dans un virage et que cela conduisait le conducteur à effectuer des erreurs.

L'objectif des travaux de [Girard, 2007] est semblable à celui de [Horrey et Lesch, 2008]. Cependant, la différence intervient au niveau de l'analyse des données. Girard a demandé aux conducteurs d'évaluer leur charge de travail à l'aide de questionnaires. Dans un premier temps, il a analysé séparément données objectives et données subjectives puis dans un deuxième temps, il a utilisé des méthodes descriptives pour mettre en relation ces deux types de données. Il en a déduit que le trafic influe sur la charge de travail et que la performance aux tâches secondaires diminue lorsque la charge de travail augmente.

La vigilance

L'objet des recherches de [Todoskoff, 1999] concerne l'étude du comportement du conducteur lors des situations de conduite monotone de longue durée sur autoroute. L'étude a porté sur dix conducteurs en simulateur de conduite. Il a utilisé, d'une part les méthodes exploratoires pour mettre en évidence les phénomènes les plus marquants, d'autre part les méthodes inférentielles pour confirmer ses résultats, tout ceci à l'aide de variables relatives au conducteur et au véhicule. Un des résultats a été que l'altération du comportement du conducteur se manifeste par des mouvements corporels plus fréquents et plus importants.

La consommation de drogues

[Richer et Bergeron, 2008] étudient l'influence de la prise de cannabis sur le comportement du conducteur. Un échantillon de 83 personnes de sexe masculin d'âge moyen 27 ans ont participé à une expérimentation sur simulateur de conduite. Avant de conduire, ils devaient remplir des questionnaires concernant la prise de cannabis et d'alcool ainsi que la fréquence de consommation. Les méthodes de tests d'hypothèse employées ont permis de montrer que conduire sous l'influence d'une substance comme le cannabis avait des

conséquences sur le comportement des conducteurs, notamment l'augmentation de la vitesse, l'apparition d'émotions négatives...

[Ahlm *et al*, 2008] étudient le rôle de la prise d'alcool ou de drogues dans les accidents de la route qui ont eu lieu au nord de la Suède. Pour cela, ils ont examiné les rapports de police et les résultats d'autopsie. D'après ces rapports, ils ont établi des tendances comme par exemple que la plupart des conducteurs contrôlés positifs au test d'alcoolémie dans les accidents étaient des hommes, roulant seuls, de nuit, le week-end. Cette étude a révélé que la proportion des conducteurs consommant ce genre de produits était plus importante que 14 ans auparavant.

La colère et l'anxiété

Les recherches de [Stephens et Groeger, 2008] explorent l'influence de la colère et de l'anxiété sur le comportement du conducteur. Ils ont fait appel à 48 participants pour tester leur hypothèse. Les essais se passent sur simulateur de conduite. Durant la conduite les participants ont eu à répondre à un questionnaire portant sur leurs émotions au moyen de questions comme par exemple : « Etes-vous calme ? ». Les réponses se faisaient au moyen d'une échelle comprise entre 1 (pas du tout) et 5 (beaucoup). Après analyse de ces réponses à l'aide de méthodes inférentielles, ils ont conclu que les personnes en colère ne violaient pas plus le code de la route que les autres, contrairement à ce qui a pu être observé par [Deffenbacher *et al*, 2002] et [Sullman, 2006] et que les personnes anxieuses avaient tendance à rouler plus vite.

3.2 Facteurs liés au véhicule

Caractéristiques du véhicule

[Simsekoglu et Lajunen, 2008] étudient comment les conducteurs utilisent la ceinture de sécurité. Un échantillon de 250 conducteurs âgés de 18 à 75 ans en Turquie a répondu à un questionnaire. Ce questionnaire comportait trois parties. La première partie porte sur l'état de santé du conducteur comme par exemple le régime alimentaire, l'exercice physique ou la consommation de cigarettes. La deuxième partie traite du comportement sur la route avec par exemple les erreurs effectuées ou les violations du code de la route. La troisième se concentre sur l'objectif de l'étude, c'est-à-dire comment les conducteurs utilisent la ceinture de sécurité : à l'avant, à l'arrière, seulement sur autoroute... Les réponses étaient données au moyen d'une échelle de Likert graduée de 1 à 5 pour la première partie et de 1 à 6 pour la deuxième.

L'exploitation des données recueillies par des méthodes inférentielles a montré que les personnes qui utilisaient la ceinture à l'avant et à l'arrière étaient celles qui faisaient attention à leur santé (régime alimentaire, pratique régulière du sport...). Les personnes qui ne l'utilisent pas sont plutôt celles qui ont tendance à ne pas respecter le code de la route.

Interactions homme-véhicule

L'objectif d'[Evans et Gerrish, 1996] est de déterminer le rôle de l'ABS en cas de choc avec un deuxième véhicule. Deux situations ont été étudiées : d'une part, quand le véhicule qui en est équipé est derrière un autre véhicule, d'autre part, quand le véhicule qui en est équipé est devant un autre véhicule qui n'a pas d'ABS. Ils se sont servis des rapports de police des Etats-Unis de 1992 et 1993 en étudiant plus particulièrement les situations sur chaussée humide. Ils ont déterminé que le véhicule équipé du système ABS avait 32% de chances en moins de percuter le véhicule qui le précède alors qu'il augmente ses chances de 30% de se faire percuter par l'arrière.

[Adell et Varhelyi, 2007] orientent leur recherche sur l'acceptation d'un système de limitation de vitesse. Ce système agit sur la pédale d'accélération en créant une résistance à l'enfoncement de 3 à 5 fois plus élevée que la normale. Un module GPS permet d'identifier la position du véhicule et de retrouver via la cartographie les vitesses maximales. L'étude a été menée en Suède entre 2000 et 2002. Le système a été placé dans 281 véhicules que leurs conducteurs ont dû utiliser durant une période allant de six mois minimum à un an. Après l'utilisation de ce système, les conducteurs ont répondu à des questionnaires dont les réponses ont été analysées à l'aide de méthodes de tests statistique. Les conducteurs ont évalué le système positivement et étant utile, efficace et plaisant. En l'utilisant, ils ont eu l'impression d'être de meilleurs conducteurs et de se sentir plus en sécurité.

[Tricot, 2005] a mené ses recherches sur l'AACC (Auto-adaptive Cruise Control). Ce système permet, d'une part de gérer l'interdistance avec le véhicule qui précède, d'autre part de prendre en compte les paramètres reflétant le style de conduite des conducteurs et les contextes environnementaux. Il a organisé une expérimentation sur simulateur pour tester deux variantes de ce système : l'AACC1 pré-avertit le conducteur lorsque celui-ci se présente trop rapidement devant une « zone à risque » puis intervient si le conducteur n'agit pas en conséquence. L'AACC2 réalise ces deux actions (avertissement et action) simultanément. Cette expérimentation a permis de récolter deux types de données : objectives (angle au volant, vitesse...) et subjectives (questionnaires, auto-confrontation...), qui ont ensuite été

analysées à l'aide de méthodes inférentielles. L'analyse des données objectives a apporté que, d'une part, les conducteurs déjà familiers à un ACC ont plus utilisé l'AACC1 que les novices, d'autre part, les conducteurs non familiers ont plus utilisé l'AACC2 que l'AACC1. L'analyse des données subjectives a montré que l'aide apportée par le dispositif est estimée comme utile, plus particulièrement par les conducteurs familiers à un ACC.

[Scully et Newstead, 2008] ont cherché à déterminer si l'utilisation de l'ESP permettait de réduire le risque d'accident. Ils ont analysé les données d'accidentologie en Australie et en Nouvelle-Zélande de 2001 à 2005. Ils n'ont gardé que les accidents où intervenaient les véhicules commercialisés après 1997. Leur base de données comprenait 203186 véhicules accidentés non équipés de l'ESP et 7699 véhicules avec ESP. Dans ce dernier ensemble, ils ont recensé 90 modèles différents pour ce système d'aide à la conduite. L'utilisation de l'ESP diminue le risque d'accidents d'un tiers dans les situations où un seul véhicule du trafic intervient. Si le véhicule accidenté a quatre roues motrices, alors ce chiffre passe à plus de la moitié. Ceci peut être expliqué par le fait que ces véhicules ont tendance à perdre leur stabilité à cause de leur centre de gravité plus haut.

[Ferlazzo *et al*, 2008] étudient les conséquences liées aux différentes façons d'utiliser le téléphone portable au volant. Pour cela, ils ont recruté 20 étudiants âgés de 23 à 30 ans pour des essais sur simulateur de conduite. Pendant la conduite, les sujets devaient tenir une conversation, soit directement avec un passager, soit au moyen d'un téléphone mobile suivant trois modalités : écouteur dans l'oreille, haut-parleur posé sur le tableau de bord et téléphone tenu en main. Pendant cette conversation, ils devaient répondre manuellement à un stimulus visuel (LED) qui apparaissait sur le rétroviseur intérieur. Les méthodes de tests d'hypothèse ont permis d'analyser leurs temps de réaction au stimulus visuel. [Ferlazzo *et al*, 2008] ont constaté que les conducteurs sont plus lents pour répondre au stimulus lorsqu'ils utilisent le téléphone tenu en main ou l'écouteur dans l'oreille que lorsqu'ils se servent du haut-parleur ou qu'ils discutent avec un passager (Figure 7).

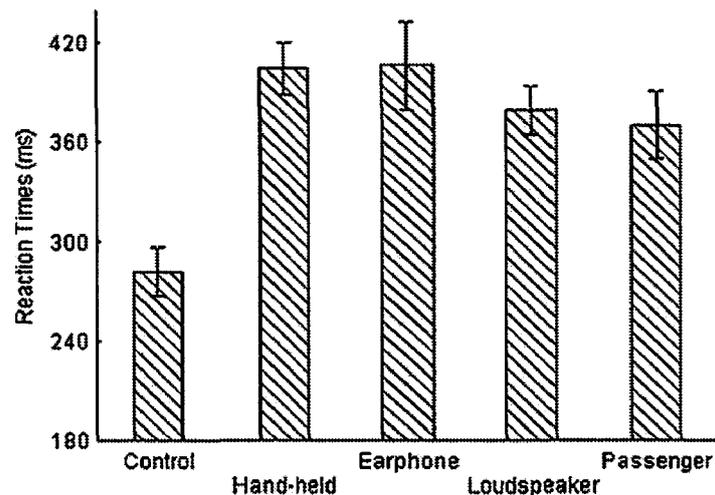


Figure 7 : Temps de réaction au stimulus visuel. [Ferlazzo *et al*, 2008]

3.3 Facteurs liés à l'environnement

Géométrie de la route

[Rosey *et al*, 2008] ont évalué l'efficacité de quatre signalisations horizontales destinées à aider le conducteur à réguler sa position latérale. Ils ont organisé une expérimentation avec ces quatre signalisations qui sont : une ligne centrale peinte sur la chaussée, des plots délimitant le bord de la route, des bandes rugueuses des deux côtés de la ligne centrale et des bandes ocre sur les bords de la route). Un échantillon de 43 participants a réalisé cette expérimentation sur un simulateur à base fixe sur une route rurale de 3 kilomètres avec deux courbes verticales (CVC). Quatre sections ont été choisies pour l'analyse : une section de référence (le premier CVC), une section d'essai (le deuxième CVC), une section de pré-test (juste avant le deuxième CVC) et une section de post-test (juste après le deuxième CVC). Les méthodes de tests ont montré que les conducteurs conduisent plus au centre de la chaussée avec deux des quatre signalisations : les bandes rugueuses des deux côtés de la ligne centrale et les bandes ocre sur les bords de la chaussée.

Catégorie de la route

[Weller *et al*, 2008] cherchent des critères objectifs pour classer les routes rurales allemandes. Ils ont invité plus d'une cinquantaine de personnes à se soumettre à une expérimentation en laboratoire. Les participants ont eu à évaluer une série d'images de routes rurales en répondant à des questionnaires. Les réponses subjectives analysées à l'aide de méthodes de tests ont permis de distinguer a posteriori trois catégories de routes rurales :

« monotone » (la charge de travail des conducteurs est très basse), « confort » (la charge de travail est normale) et « exigeante » (la charge de travail est très élevée). Ces évaluations subjectives sont grandement corrélées avec des critères objectifs comme la surface de la route, la largeur ou le marquage routier (ex : ligne centrale). Leur but est maintenant de créer un modèle basé sur ces critères objectifs pour classer les différents types de routes.

Obstacles et configurations de réseaux

[Terry *et al*, 2008] étudient la capacité des conducteurs à détecter la décélération du véhicule qui précède. Pour cela, ils ont monté une expérimentation avec différentes modalités pour la taille des véhicules précédents (voiture, fourgon, ou camion) et roulant à différentes vitesses (50, 70, ou 100km/h). Les 78 participants ont eu la consigne d'utiliser le régulateur de vitesse autant que possible. Lors d'une décélération du véhicule qui précède, (feux stops allumés), les temps de freinage et l'interdistance entre les deux véhicules étaient enregistrés. L'ajout de tâches secondaires pendant l'expérimentation a permis de voir comment les conducteurs distraits réagissaient à la décélération du véhicule de devant. L'analyse inférentielle a montré que les conducteurs réalisant une tâche ajoutée étaient plus proches du véhicule de devant, indépendamment de la taille de ce véhicule.

Conditions climatique et d'éclairage

Il a été constaté que le verglas induisait un risque élevé d'accident de la route, particulièrement dans les pays nordiques. Pour cette raison, [Kilpeläinen et Summala, 2006] ont mené une étude sur les effets des prévisions météorologiques sur le comportement des conducteurs en Finlande. Un échantillon de 1437 conducteurs a répondu à un questionnaire sur la perception du temps, leur comportement de conduite, l'acquisition des données météorologiques avant de prendre la route et leur éventuel changement d'itinéraire. Les questionnaires ont été distribués dans les stations-service dans différentes conditions de temps et de conduite. Des données de prévisions météorologiques et des compteurs de véhicules du trafic ont été également rassemblées. L'analyse inférentielle de ces données objectives et subjectives a permis de déterminer, par exemple, que les véhicules diminuaient leur vitesse de 6 à 7 km/h lors de conditions météorologiques défavorables et que les conducteurs prévenus du mauvais temps évaluaient leur risque d'accident plus élevé que les autres.

Environnement immédiat

[Yan *et al*, 2008] se sont focalisés sur le franchissement d'intersection lorsque le feu tricolore passe à l'orange. Les auteurs ont eu l'idée d'inscrire au sol avant ce feu « signal ahead » pour prévenir les conducteurs et ont testé leur approche du feu via un simulateur de conduite. Un échantillon de 42 personnes a participé à l'expérimentation qui consistait à franchir deux intersections avec des vitesses maximales autorisées différentes. Ils ont analysé l'impact de l'inscription sur la chaussée, le franchissement de l'intersection au feu rouge, le temps de freinage et le taux de décélération du véhicule lors de l'arrêt. Les résultats des méthodes inférentielles ont indiqué que l'inscription a des effets positifs sur le comportement des conducteurs aux intersections signalées en réduisant les probabilités de passer au feu orange ou rouge et en contribuant à obtenir une décélération moins forte lorsque les conducteurs à vitesse élevée doivent s'arrêter à une intersection (Figure 8).

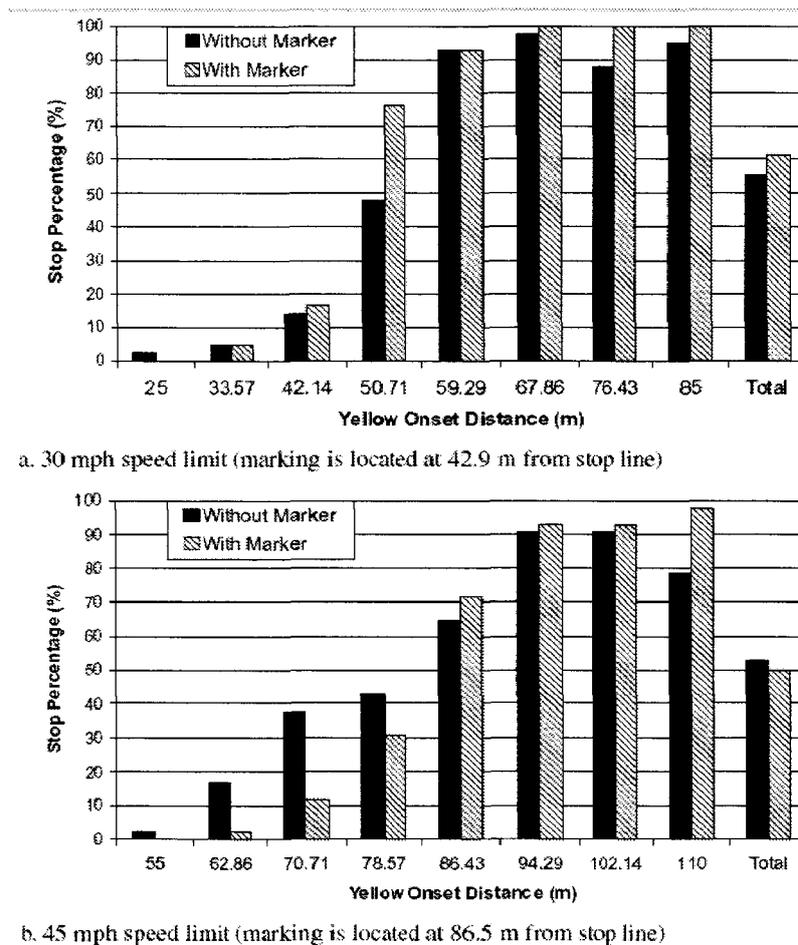


Figure 8 : Pourcentage d'arrêt au feu par rapport à la distance séparant l'inscription du feu. [Yan *et al*, 2008]

Environnement au sens large

[Vashitz *et al*, 2008] se sont concentrés sur les problèmes qu'imposait le passage d'un véhicule dans un tunnel. Comme les informations transmises par les systèmes embarqués peuvent augmenter la charge de travail et la distraction mentale en situation de conduite normale, l'utilisation de ces systèmes dans les tunnels est encore plus néfaste. Les auteurs ont donc simulé un environnement de conduite avec passage dans un tunnel et ont comparé, d'une part un affichage fortement instructif sur les conditions de circulation dans le tunnel avec, d'autre part, un affichage donnant un minimum d'information. Quinze étudiants ont participé à l'expérimentation. Il en ressort que les conducteurs ont adapté leur vitesse aux conditions de circulation mais ont eu des difficultés dans le maintien de la trajectoire, difficultés apparemment dues à une certaine distraction imposée par les affichages. Cependant, la charge de travail est identique quel que soit le type d'affichage. L'affichage fortement instructif a fourni aux conducteurs plus d'informations, ce qui a réduit l'inquiétude et l'ennui, émotions ressenties pendant le passage dans un tunnel.

3.4 Synthèse

Dans cette partie, nous avons vu les nombreux facteurs différents étudiés en conduite automobile. Ce tour de la littérature montre qu'il y a une multitude de situations de conduite qui peuvent être étudiées et qu'il est très difficile d'en étudier plusieurs à la fois.

Dans le système Conducteur-Véhicule-Environnement (SCVE), et plus particulièrement concernant le conducteur, certaines études portent sur l'état interne du conducteur avec notamment l'étude de la charge de travail, la vigilance, la colère et l'anxiété, la consommation de drogues ou d'alcool tandis que d'autres portent sur les caractéristiques du conducteur avec l'étude de l'influence de l'âge ou du sexe. Concernant le véhicule, les études portent principalement sur les interactions homme-machine : usage de systèmes d'aide comme l'ABS ou plus récemment l'ESP ou l'ACC, usage du téléphone portable... Quelques études s'intéressent aux caractéristiques du véhicule avec par exemple l'usage de la ceinture de sécurité. Concernant l'environnement, le nombre d'études des différents items est égal, on peut citer par exemple l'étude de la géométrie et la catégorie de la route, les conditions d'éclairage et climatiques...

Toutes ces études montrent une grande diversité au niveau de la méthode utilisée :

- étude basée sur un plan d'expérience [Todoskoff, 1999] ou sur un plan d'observation [Fredette *et al*, 2008]
- expérimentation sur route réelle [Bao et Boyle, 2008] ou sur simulateur de conduite [Richer et Bergeron, 2008]
- données objectives [Vashitz *et al*, 2008] et/ou subjectives [Hatfield et Fernandes, 2008]
- analyse descriptive [Girard, 2007] ou inférentielle [Kilpeläinen et Summala, 2006].

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le plus important est de se consacrer à la sécurité active en informant le conducteur le plus tôt possible des dangers qui pourraient le conduire au crash. Parmi les situations à risque, nous avons choisi de nous focaliser sur une manœuvre spécifique de la conduite automobile : le changement de voie sur réseaux autoroutiers. Cette manœuvre est particulièrement dangereuse puisque la vitesse sur ces réseaux est élevée et que la visibilité est réduite en raison des angles morts dans les rétroviseurs. L'étudier pourrait nous aider à comprendre quelles sont les actions du conducteur tout au long de cette manœuvre et prévoir des systèmes qui pourraient l'alerter en cas de dépassement dangereux. Faisant partie d'un sous-ensemble de la conduite automobile, les études seront donc moins nombreuses, ce qui nous permettra de les décrire avec un peu plus de détails.

4 Cas du changement de voie

Cette partie concernera exclusivement une seule manœuvre : le changement de voie. Elle sera organisée de la même manière que la partie précédente concernant les facteurs étudiés en conduite automobile. Et pour chacun des facteurs, nous avons choisi de détailler une seule publication qui est représentative de plusieurs études faites sur le domaine.

4.1 Facteurs liés au conducteur

[Clarke *et al*, 1998] veulent déterminer quel effet a le facteur âge sur les accidents liés à des manœuvres de dépassement. Pour cela, ils ont étudié 973 rapports de police concernant ce type d'accident en Angleterre de 1989 à 1993. Chaque rapport a été analysé par deux chercheurs considérés comme conducteurs expérimentés. Ces rapports ont été classés suivant deux niveaux : niveau A correspondant à un rapport très détaillé sur les circonstances de

l'accident et niveau B donnant moins de détails. Trois items principaux ont été choisis pour représenter les circonstances de l'accident : une description du déroulement de l'accident rapportée par des personnes présentes sur le lieu de l'accident, un plan schématisant le lieu de l'accident et les facteurs pouvant expliquer l'accident (âge, sexe, prise d'alcool...). Chaque manœuvre de dépassement liée à un accident est classée suivant 10 types, comme par exemple, un véhicule entrant en collision avec un véhicule tournant à droite à une intersection (type 1), un véhicule entrant en collision frontale avec un véhicule voulant tourner à gauche à une intersection (type 2) et la perte de contrôle lorsque le véhicule est en train de dépasser (type 5). L'âge des personnes concernées par ce type d'accidents se situe dans l'intervalle [16 - 81] ans. Cet intervalle a été divisé en 10 intervalles de largeurs égales et, pour chaque groupe d'âge et de type de manœuvre, des méthodes de tests ont été appliquées. Il en ressort principalement que pour la manœuvre de type 1, il n'y a pas de différence significative entre les différents groupes d'âge. Pour le type 2, les populations des [43 - 48] et [69 - 74] ans sont sous représentées alors que la population des [75 - 81] ans est sur représentée. Pour finir, la manœuvre de type 5 est surtout liée à la population des plus jeunes, c'est-à-dire les [16 - 22] ans. En conclusion, ils retiennent que les accidents ayant lieu près des intersections sont plus fréquents avec les conducteurs plus âgés et peuvent être dus à l'inattention de ces conducteurs qui augmente avec l'âge. De plus, leurs mouvements plus lents et plus hésitants peuvent frustrer les jeunes conducteurs, ce qui les pousse à effectuer des dépassements imprudents.

[Leung et Starmer, 2005] étudient le rôle de l'alcool sur les performances de conduite du conducteur, notamment dans la manœuvre de dépassement. Ils ont organisé une expérimentation sur simulateur de conduite avec 32 personnes de l'université de Sydney qui ont absorbé une dose d'alcool et une dose de placebo. Durant la conduite, ces personnes avaient trois tâches à réaliser. Dans la tâche 1, elles devaient appuyer sur un bouton dès qu'elles voyaient dans leur champ de vision un véhicule du trafic. Dans la tâche 2, les personnes devaient estimer en appuyant sur un bouton l'endroit sur la chaussée où un véhicule du trafic aurait atteint leur véhicule si elles continuaient sur leur lancée. Dans la tâche 3, elles devaient dépasser le véhicule qui les précède. Pour ces trois tâches, les expérimentateurs ont relevé : le temps de détection du véhicule pour la tâche 1, le TTC dès l'appui sur le bouton pour la tâche 2 et l'interdistance entre les deux véhicules ainsi que la vitesse moyenne du véhicule du participant durant la phase de dépassement pour la tâche 3. Les méthodes inférentielles utilisées ont permis de constater que l'alcool augmentait le temps de détection dans les virages pour la tâche 1 alors qu'il n'avait aucun effet sur les tâches 2 et 3 (Figure 9).

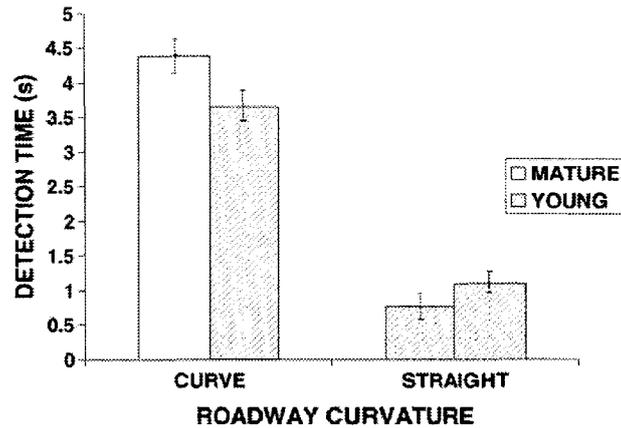


Figure 9 : Temps de détection du véhicule suivant la géométrie de la route. [Leung et Starmer, 2005]

Ces résultats permettent de conclure que la consommation d'alcool a un effet néfaste sur l'attention du conducteur mais n'altère pas forcément ses processus décisionnels.

4.2 Facteurs liés au véhicule

[Sivak *et al*, 2006] étudient l'influence de l'obstruction de la vision latérale du conducteur lors des changements de voies. Pour cela, ils choisissent 10 modèles de voitures qui existent en deux et quatre portes, la vitre des voitures de deux portes permettant d'avoir un champ visuel latéral plus grand que les voitures de quatre portes. Chaque modèle doit être impliqué dans au moins cinq accidents de leur base de données. Cette base de données provient de Caroline du Nord entre 2000 et 2003 et compte tous types d'accidents : personnes blessées, tuées mais aussi dégâts matériels. Les auteurs séparent les accidents en deux types : changer de voie *vs.* rester dans sa voie, autrement dit besoin de la vision latérale *vs.* aucun besoin de la vision latérale. Les résultats montrent que les conducteurs ont trois fois plus de probabilités d'avoir un accident avec une voiture de quatre portes lors d'un changement de voie. Ceci permet de dire que la vision latérale est importante pour assurer la sécurité du conducteur. Néanmoins, cette étude montre aussi qu'il y a des accidents quand le conducteur ne fait que rester sur sa voie, accidents ne pouvant être dus à l'obstruction de la vision latérale mais à la gêne occasionnée, par exemple par les montants autour du pare brise avant.

[Kiefer et Hankey, 2008] étudient la mise en place d'un système permettant de contrôler les angles morts et d'avertir le conducteur de la présence d'un véhicule. Ils ont instrumenté un véhicule et ont placé des caméras à l'extérieur du véhicule pour détecter la présence d'autres véhicules, le système d'alerte, composé de plusieurs LEDs, étant placé sur

le rétroviseur extérieur droit. Un échantillon de 32 conducteurs américains ont participé à l'expérimentation. Durant la phase de conduite, un expérimentateur prenait place sur le siège passager et le conducteur devait conduire une fois avec le dispositif et une fois sans. La route choisie comporte plusieurs voies et certaines portions comprennent une voie pour véhicules lents pour créer des conditions propices à un dépassement. Ils ont récolté au total 1111 changements de voie à gauche et 1006 changements de voie à droite. Parmi ces derniers, 922 changements de voie ont eu lieu sans le dispositif et 1195 avec le dispositif. Ils ont constaté que la fréquence des changements de voie était égale à celle observée dans la vie courante. A l'aide de méthodes inférentielles, ils ont pu montrer que ce dispositif réduisait la probabilité que le conducteur oublie de vérifier dans ses rétroviseurs extérieurs l'absence de danger puisque son œil était attiré par les LEDs clignotantes. Les conducteurs ont trouvé que ce système fournissait des informations utiles sur le trafic et les assistait dans leur conduite.

4.3 Facteurs liés à l'environnement

[Van Winsum *et al*, 1999] étudient l'influence de l'information visuelle provenant de l'environnement sur les actions du conducteur pendant les changements de voie. Pour cela, ils ont organisé une expérimentation sur simulateur de conduite. Huit personnes âgées de 25 à 50 ans y ont participé. Le circuit est une autoroute à 2*2 voies avec différentes modalités pour le facteur vitesse (50, 80 ou 120 km/h), le facteur largeur de la chaussée (3.1 ou 3.5 m) et la direction du changement de voie (de la voie de droite vers la voie de gauche ; de la voie de gauche vers la voie de droite ; de la voie de droite vers la bande d'arrêt d'urgence ; de la bande d'arrêt d'urgence vers la voie de droite). Chaque sujet a effectué 48 changements de voie mais seuls ceux effectués en ligne droite ont été analysés. Les auteurs ont observé que cette manœuvre pouvait être divisée en trois phases (Figure 10).

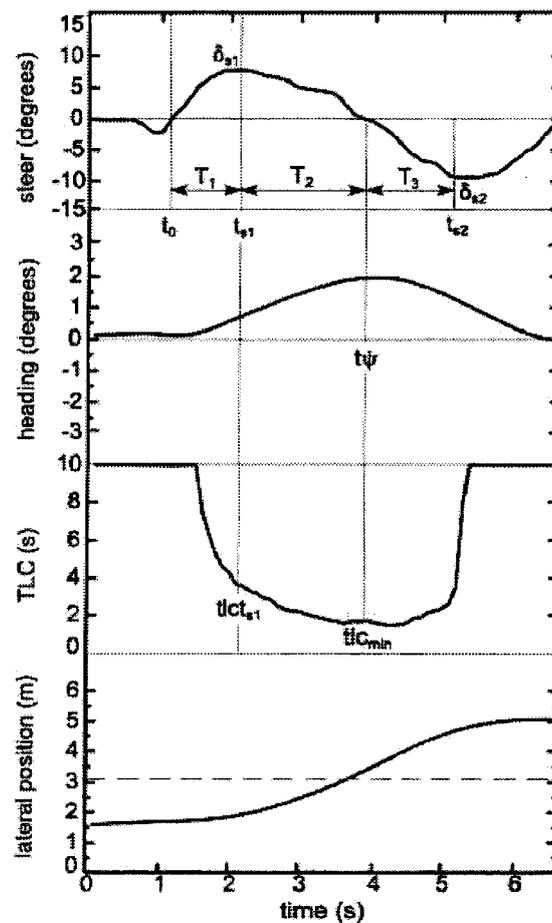


Figure 10 : Déroulement d'un déboîtement pour un participant. [Van Winsum *et al.*, 1999]

La phase T1 débute quand le conducteur commence à tourner le volant et s'arrête quand l'angle du volant atteint le maximum mT1. La phase T2 débute alors et s'arrête quand le volant revient à son point initial et la phase T3 se termine alors lorsque l'angle au volant atteint un minimum mT3. Pour chaque phase et chaque condition expérimentale, l'angle au volant, la vitesse du véhicule et le calcul du TLC sont analysés à l'aide de méthodes inférentielles. Il semble que les durées moyennes de T1 et T2 ne soient pas affectées par les conditions expérimentales alors que la modalité vitesse influe sur la durée moyenne de T3. Le maximum mT1 et le minimum mT2 de l'angle au volant semblent être affectés par le facteur vitesse. Le TLC au moment du maximum mT1 n'est pas influencé par les différents facteurs, contrairement au TLC entre les phases T2 et T3 qui est influencé par la vitesse et la direction du changement de voie. En conclusion, le retour visuel est utilisé par le conducteur durant les changements de voie pour ajuster ses actions sur le volant mais aussi pour garder des marges de sécurité suffisantes.

[Sato et Akamatsu, 2007] étudient l'influence de la position de deux véhicules, un à l'avant et l'autre à l'arrière du véhicule sujet, lorsque celui-ci se prépare à tourner à droite à une intersection. Pour cela, ils ont instrumenté quatre véhicules et ont demandé à 4 personnes de tourner plusieurs fois à droite ou à gauche dans les intersections de routes japonaises. Les informations enregistrées sont de deux types : les actions du conducteur (position des pieds sur les pédales, clignotant...) et les informations provenant de l'environnement (différentiel de distance et de vitesse entre les trois véhicules...). Les méthodes de test d'hypothèse ont montré que les conducteurs avaient conduit à une vitesse inférieure lorsqu'ils suivaient de près le véhicule de devant et qu'il y avait d'autres véhicules devant et/ou derrière le véhicule sujet. Ils ont aussi montré que la vitesse et l'interdistance avec les véhicules de devant et de derrière influencent l'endroit sur la chaussée ainsi que le moment auquel les conducteurs libèrent la pédale d'accélérateur et déplacent leur pied droit pour couvrir la pédale de freinage. Cependant, ces paramètres n'influencent pas le moment de la mise du clignotant.

4.4 Autres études

Dans la littérature, il existe d'autres études qui ne peuvent être classées dans les catégories citées précédemment. En effet, l'objectif d'une grande majorité de chercheurs est d'observer le comportement du conducteur afin de créer un système d'aide au dépassement. En voici quelques unes.

[Nigro *et al*, 2002] ont pour objectif d'identifier automatiquement les manœuvres de dépassement d'un conducteur automobile. Ils ont ainsi créé le système IDRES (Intelligent Driving Recognition with Expert System). La base de données provient d'un simulateur logiciel qui met en interaction deux véhicules VE (Véhicule Expérimental) et VC (Véhicule Cible) sur autoroute, VE dépassant VC. Ce système prend en compte différentes informations afin d'identifier la manœuvre en cours comme l'accélération de VE, la position du véhicule sur la voie... Le système IDRES permet d'identifier une manœuvre parmi quatre manœuvres : le dépassement normal, le changement de file à gauche, le dépassement différé et le changement de file à droite. Chacune de ces manœuvres est décrite par une succession d'états. Par exemple, pour la manœuvre 'dépassement normal', les neuf états sont :

- intention de dépasser,
- début du changement de voie vers la gauche,
- franchissement de la ligne discontinue de gauche,

- fin du changement de voie vers la gauche,
- dépassement du véhicule de devant,
- fin du dépassement,
- début du changement de voie vers la droite,
- franchissement de la ligne discontinue de droite,
- fin du changement de voie vers la droite.

Pour reconnaître une manœuvre, ces états doivent être identifiés, c'est le rôle du premier niveau de décision du système IDRES à l'aide des règles-conseils déclaratives. Ces règles, à partir des informations enregistrées, vont valider un ou plusieurs états simultanément. Les règles sont au nombre de dix et ont été développées en utilisant le formalisme et le moteur d'inférences CLIPS. Ensuite, le second niveau de décision, à chaque instant t , va permettre à l'aide d'un ou de plusieurs états validés et de la liste de manœuvres d'identifier quelle manœuvre est en cours de réalisation. Trois règles permettent de faire ce travail. À noter que pour chaque manœuvre, si les états ne se déroulent pas dans l'ordre chronologique établi alors la manœuvre est abandonnée. De nouvelles données ont été simulées, le système IDRES reconnaît actuellement les quatre types de manœuvres décrites précédemment. La reconnaissance de la manœuvre se fait en temps réel, ainsi la manœuvre n'est reconnue entièrement qu'à la fin.

[Salvucci et Liu, 2002] étudient l'évolution du comportement du conducteur lors des changements de voie pour le modéliser. L'expérimentation s'est réalisée dans un environnement simulé comprenant une autoroute à 2*2 voies (sans ou avec virages) et des véhicules du trafic roulant entre 80 et 115 km/h. Ils ont enregistré deux types de données : d'une part, les données objectives constituées des mesures provenant du simulateur (vitesse, position latérale...) et des mouvements des yeux, d'autre part les données subjectives issues de protocoles verbaux. Durant les manœuvres, les 11 participants devaient indiquer leur intention de changer de voie, le dépassement du véhicule de devant et la fin du dépassement. L'enregistrement de cette verbalisation a permis de déterminer le début et la fin de chaque changement de voie (déboîtement et rabattement sont analysés séparément). Chaque segment a été prolongé au début et à la fin de 80% de la durée totale de la manœuvre de dépassement. Quelques résultats importants sont expliqués. Premièrement, les conducteurs ont montré une légère tendance à se rapprocher de la ligne centrale dans les 5 secondes précédant le début de

la manœuvre. Ceci peut être expliqué par le fait que le conducteur se prépare en regardant l'environnement afin de déterminer s'il peut poursuivre ou pas sa manœuvre. Deuxièmement, les conducteurs ont ralenti légèrement avant le moment de déboîter, ont accéléré peu après et ont maintenu cette vitesse jusqu'au rabattement. Ensuite ils ont décéléré pour revenir à leur vitesse de croisière. Troisièmement, les conducteurs ont utilisé leurs avertisseurs lumineux avant le moment de déboîter pour prévenir les autres usagers de leur intention de changer de voie. Quatrièmement, les conducteurs ont commencé à décaler leur regard vers la voie de destination 5 secondes avant le début de la manœuvre alors que, sans changement de voie, ils n'ont pas décalé leur regard.

[Kuge *et al*, 1998] utilisent le principe des chaînes de Markov pour décrire le comportement du conducteur comme une séquence d'actions élémentaires, chacune de ces actions correspondant à un état particulier dans le SCVE et étant caractérisée par un ensemble de variables observables. Un simulateur de conduite dynamique capable de représenter un environnement routier a été utilisé afin d'obtenir une base de données sur le comportement du conducteur. Dix participants ont été retenus pour participer à cette campagne expérimentale, dont cinq hommes et cinq femmes, âgés de 20 à 30 ans. Il leur a été demandé de conduire sur la voie de gauche (l'équivalent de la voie de droite en France) à une vitesse de 80 km/h. Les participants ont rencontré trois types de situations : *changement de voie ordinaire* (un texte apparaissait sur l'écran et le participant devait effectuer un dépassement comme s'il se trouvait en situation de conduite réelle); *changement de voie en urgence* (un camion apparaissait soudainement devant le sujet à une distance de 2,5 secondes. Le participant a été prévenu qu'il allait rencontrer un obstacle et qu'il devrait le dépasser mais il ne savait pas quand cela allait arriver); *conservation de sa voie de départ* (quand aucune instruction n'était donnée, le participant devait rester sur la voie de gauche.) Chacune des trois manœuvres est caractérisée par un modèle de Markov différent. Tout au long de la manœuvre, un modèle de comportement du conducteur basé sur l'observation est créé grâce aux données de l'angle au volant et sa dérivée ainsi que la force appliquée sur le volant. Le modèle est ensuite comparé aux modèles de Markov de chaque manœuvre pour reconnaître celle qui est en train d'être effectuée.

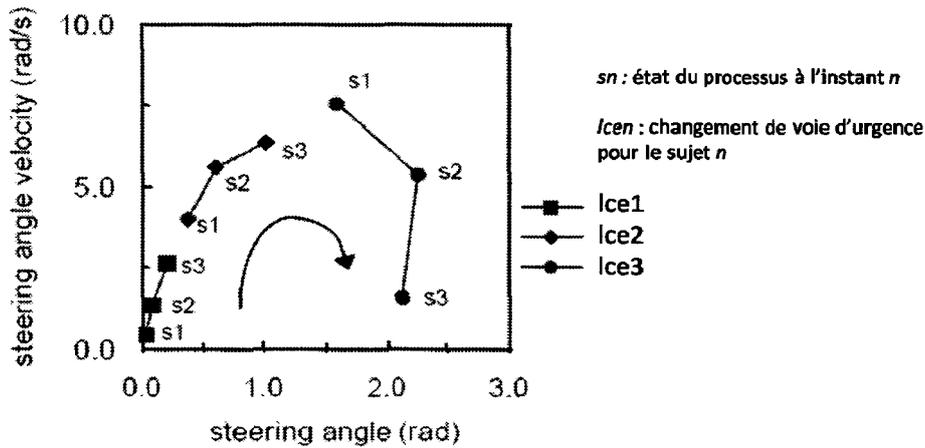


Figure 11 : Dérivée de l'angle au volant en fonction de l'angle au volant lors des changements de voie en urgence (LCE). [Kuge *et al*, 1998]

Pour la conservation de la trajectoire, les données sont extraites pendant une période de 5 secondes, pour les autres manœuvres, les données sont analysées de la présentation de la commande au premier pic de l'angle au volant. En ce qui concerne le changement de voie d'urgence, le taux de reconnaissance est de 100%. Ceci est dû au fait que le volant est tourné brutalement d'où il en résulte une variation très forte de l'angle au volant. La conservation de la trajectoire est identifiée seulement si les variables angle au volant et sa dérivée (Figure 11) sont utilisées; le taux de reconnaissance de la manœuvre est également de 100%. La manœuvre changement de voie normal est la plus difficile à identifier puisque l'angle au volant augmente progressivement au début de la manœuvre; il n'y a donc pas de différence franche entre le moment où le conducteur est en ligne droite et le moment où il commence à dévier sa trajectoire. Cependant, en utilisant l'angle au volant et sa dérivée, la manœuvre est quand même reconnue à 100%. Ces manœuvres sont reconnues en moyenne 0,7 secondes après le premier changement de l'angle au volant.

[Pentland et Liu, 1998] se sont basés sur le même principe que [Kuge *et al*, 1998]. L'expérimentation a eu lieu sur le même simulateur. Plusieurs instructions ont été données pendant l'expérimentation : s'arrêter à la prochaine intersection, instruction présentée à 70 mètres de l'intersection ; tourner à gauche à la prochaine intersection ou tourner à droite, instructions présentées à 40 mètres de l'intersection ; changer de voie ; dépasser le véhicule de devant, présentée à 30 mètres du véhicule ; continuer à conduire sans effectuer de manœuvre particulière. Chacune de ces manœuvres est décrite par un modèle de Markov comme dans les travaux de [Kuge *et al*, 1998]. Prenons l'exemple de la manœuvre de dépassement qui est

représentée par une suite successive d'étapes qui sont : le véhicule étant centré sur la voie courante, le conducteur regarde autour de lui pour s'assurer qu'il peut dépasser ; il commence à tourner le volant pour quitter sa voie ; il dépasse le véhicule de devant ; il tourne le volant pour revenir dans sa voie initiale; enfin, il recentre le véhicule sur cette voie. Deux secondes seulement avant le début d'une manœuvre, celle-ci est reconnue avec un pourcentage moyen de reconnaissance de $95.24\% \pm 3.1\%$.

[Hegeman *et al*, 2005] considèrent qu'une analyse préliminaire concernant les manœuvres de dépassement est nécessaire pour concevoir un système d'aide au dépassement. Pour mener à bien cette analyse, deux séries de données ont été utilisées. Tout d'abord, les observations ont eu lieu sur une deux voies aux Pays-Bas limitée à 100 km/h avec trafic en sens inverse. Ces observations sont été filmées et surveillées par des expérimentateurs. Ensuite, la deuxième série a été obtenue à l'aide d'un véhicule expérimenté qui circulait sur cette route en filmant les usagers non avertis de cette mesure. Les informations extraites de ces séries d'observations sont l'utilisation des clignotants, le temps de la manœuvre de dépassement et le TTC. Chaque manœuvre de dépassement peut être découpée de la manière suivante : le conducteur décide de dépasser le véhicule de devant, il se prépare à le dépasser, il change de voie, il le dépasse et il se rabat sur sa voie de départ (Figure 12).

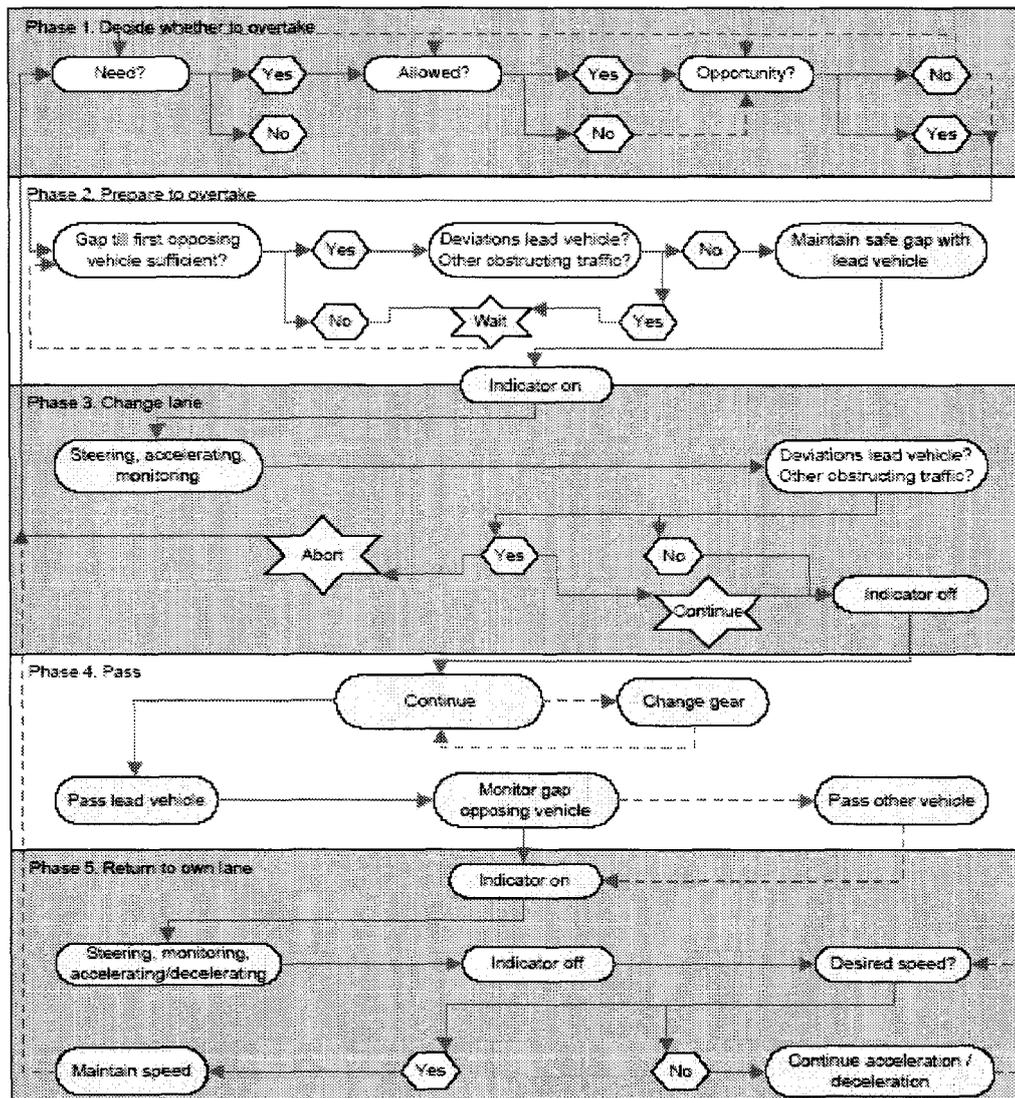


Figure 12 : Modèle de Hegeman. [Hegeman *et al*, 2005]

Il en ressort quatre stratégies de dépassement : « *accelerative* » (le véhicule sujet accélère pour dépasser le véhicule de devant), « *flying* » (le véhicule sujet dépasse le véhicule de devant à vitesse constante), « *piggy backing* » (le véhicule sujet dépasse les véhicules de devant et celui de devant déboîte également pour se retrouver devant lui) et « *2+* » (le véhicule sujet dépasse plus de deux véhicules en même temps). De toutes ces informations, un modèle de dépassement sur routes rurales avec trafic en sens inverse a été créé.

[Tang *et al*, 2007] ont concentré leur recherche sur la création d'un modèle basé sur les modèles numériques. Ce modèle prend en compte différentes variables qui ont été obtenues après simulation : l'accélération et la décélération du véhicule, le temps mis pour changer de voie et l'interdistance entre les deux véhicules. En sortie du modèle, le temps requis pour effectuer la manœuvre, le temps pour effectuer cette manœuvre, l'évolution

spatiale du véhicule et la distance nécessaire à un dépassement sont calculés. Le flux de trafic est décrit correctement par le modèle ainsi que le comportement du conducteur après comparaison avec des situations réelles de dépassement.

4.5 Synthèse

Cette partie a été exclusivement consacrée à la manœuvre de changement de voie. Pour chacune des composantes du SCVE, une étude par facteur a été expliquée. Ces études servent essentiellement à mieux comprendre le comportement du conducteur lors de cette manœuvre. D'autres études portent sur l'élaboration d'un modèle en temps-réel afin de prévoir le comportement du conducteur en vue de développer un système d'aide au changement de voie qui contrairement aux systèmes existants tiendraient compte des actions du conducteur.

Dans cette partie, nous avons vu qu'il y avait une très grande diversité dans toutes ces études pour les raisons suivantes :

- étude basée sur un plan d'expérience [Kuge *et al*, 1998] ou sur un plan d'observation [Clarke *and al*, 1998]
- échelles de temps différentes allant de quelques minutes [Salvucci et Liu, 2002] à plusieurs années [Clarke *et al*, 1998]
- expérimentation sur route réelle [Sato et Akamatsu, 2007] ou sur simulateur de conduite [Van Winsum *and al*, 1999] ou données simulées [Nigro *et al*, 2002]
- analyse de données objectives [Pentland et Liu, 1998] et/ou subjectives [Kiefer et Hankey, 2008]
- enregistrement de variables provenant du conducteur [Salvucci et Liu, 2002] et/ou du véhicule [Kuge *et al*, 1998] et/ou de l'environnement [Sato et Akamatsu, 2007] ou variables calculées [Leung *et al*, 2005]
- condition du changement de voie : autoroute [Kiefer et Hankey, 2008] ou autres routes [Pentland et Liu, 1998], avec trafic [Hegeman *et al*, 2005] ou sans trafic, dépassement d'un véhicule [Nigro *et al*, 2002] ou un changement de voie [Sato et Akamatsu, 2007] ...
- l'objectif de l'étude : influence d'un facteur [Sivak *et al*, 2006] ou création d'un modèle du comportement [Tang *et al*, 2007]

D'après la littérature, une première phase d'analyse semble indispensable pour étudier l'influence d'un facteur ou même pour décrire le comportement du conducteur avant de le modéliser : plusieurs auteurs décomposent la manœuvre de dépassement en plusieurs étapes puisque chaque étape est caractérisée par un comportement particulier. L'étude temporelle semble donc indispensable pour pouvoir étudier l'évolution du comportement du conducteur au cours du temps et trouver des informations qui pourraient nous aider à anticiper ses actions afin de le prévenir de situations de dépassement dangereuses.

La plupart des études mentionnent les méthodes de tests d'hypothèse mais n'y a-t-il pas d'autres méthodes et quelles sont les différentes étapes pour mener à bien une analyse ? Des réponses à ces questions seront apportées dans le chapitre suivant.

5 Conclusion

Des actions sont menées aussi bien par le gouvernement que par les constructeurs automobiles pour réduire l'insécurité sur les routes. Même si cette insécurité tend à baisser, leurs efforts continuent afin de la réduire au maximum. Nous avons vu que pour mener à bien ce combat, il fallait étudier le conducteur dans son environnement de conduite afin de mieux comprendre les facteurs qui le conduisaient à un crash. La conduite automobile offre une très grande diversité de situations complexes à étudier, nous nous sommes donc focalisés sur les manœuvres de dépassement sur les réseaux autoroutiers. En effet, cette manœuvre peut s'avérer dangereuse étant donnée la vitesse élevée et le problème des angles morts. De plus, l'étudier pourrait nous permettre de trouver des éléments de réponse pour alimenter un système d'aide au dépassement. Certains véhicules sont déjà équipés de ce type de système dont le principe consiste à activer une alarme lumineuse lorsqu'un véhicule est dans le champ des angles morts de la rétrovision afin de le prévenir. Le problème est que ce type de système donne des informations en continu même quand le conducteur n'a pas l'intention de dépasser. Trop d'informations pourraient induire une trop grande charge de travail et mener le conducteur à un accident [Girard, 2007]. C'est pour cela qu'il serait intéressant de détecter dans les actions du conducteur des modifications spécifiques à la manœuvre de changement de voie pour faciliter son anticipation par le système. Dans ce but, nous proposerons une démarche d'analyse dans le chapitre suivant.

II Méthodes d'exploitation des données

1 Introduction

L'étude d'un système à composantes humaine et technologique requiert le recueil de nombreuses données qui sont généralement de natures diverses : temporelles et/ou non temporelles, qualitatives et/ou quantitatives, etc., et ce dans de nombreuses situations d'observation du système. Ces multiplicités et diversités ne sont pas sans poser problème au niveau de l'analyse statistique. Notamment, il est nécessaire de les transformer et de les exploiter au moyen d'outils permettant à l'utilisateur potentiel (ergonome, psychologue, médecin, ingénieur, ...) d'en avoir une représentation simplifiée [Loslever *et al*, 1997].

Le but de ce second chapitre est de décrire cette démarche de transformation. Après une description succincte des différentes parties qui constituent une étude empirique, nous nous focaliserons principalement sur une de ces parties : l'analyse statistique, élément essentiel de la suite de cette thèse.

2 Notations

Pour faciliter la compréhension tout au long de ce mémoire, le système de notation suivant est utilisé :

- Une même lettre écrite sous différentes formes peut être utilisée pour décrire des notions différentes relatives à un ensemble. Une lettre majuscule avec contour désigne l'ensemble (ex : ensemble \mathcal{E}), une simple lettre majuscule désigne sa taille (ex : $E = \text{card}(\mathcal{E})$, où card désigne la fonction cardinal) et une lettre minuscule désigne son terme générique (ex : $e = 1, \dots, E$).
- Pour désigner un ensemble de données initial, susceptible d'être modifié, nous utilisons "0" (ex l'ensemble initial $\mathcal{E}0$), la première transformation de cette ensemble est appelée "ensemble $\mathcal{E}1$ " et ainsi de suite.
- Une lettre en caractère gras est utilisée pour désigner un vecteur, une matrice ou un tableau (ex : $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)'$ ou $\mathbf{X} = \mathbf{x} * \mathbf{x}'$).

$U=\{X_u, u=1, \dots, U\}$ et $V=\{Y_v, v=1, \dots, V\}$ sont respectivement l'ensemble des facteurs susceptibles d'agir sur le système et l'ensemble des variables traduisant l'état du système. L'indice i est utilisé pour désigner l'individu (par exemple, le participant dans une expérimentation). Les indices s , t et f correspondent à des indices de fenêtres spatiales, temporelles et fréquentielles, respectivement.

3 L'étude empirique

3.1 Objectifs

D'une manière générale, trois objectifs essentiels peuvent être évoqués. [Loslever, 2000] distingue :

- La construction de modèles de référence sur l'ensemble des variables mesurées sous forme de valeurs chiffrées (moyennes, dispersion, proportions) ou de graphiques.
- L'élaboration de modèles relationnels, que ce soit entre les variables ou entre les facteurs et les variables (relations de causes à effets).
- L'élaboration de modèles catégoriels et plus particulièrement la recherche de classes de situations empiriques (classification) ou l'affectation de situations à des classes préexistantes (classement ou discrimination).

3.2 Différentes étapes de l'étude empirique

Une fois les objectifs de l'étude précisés, quatre étapes essentielles (figure 13) interviennent [Loslever *et al*, 1997] :

- 1) La mise en place des moyens de mesure, les variables mesurées pouvant être de nature objective et/ou subjective, qualitative et/ou quantitative, temporelle et/ou non temporelle.
- 2) La planification de l'étude autour d'un plan d'observations ou d'un plan d'expériences. D'après la figure 5 du chapitre I, on peut voir les entrées du système comme les U variables expérimentées appelées facteurs (ex : vitesse du véhicule de devant), U' variables contrôlées non expérimentées (ex : sexe, âge) et U'' variables non contrôlées (ex : la météo) ; les sorties sont alors les V variables mesurées (ex : vitesse du véhicule sujet, angle au

volant). Les deux principaux objectifs sont d'étudier d'une part, les effets des $U+U'+U''$ facteurs sur les V variables mesurées, d'autre part, les relations entre les V variables.

3) La collecte des données en laboratoire ou sur le terrain. Il est possible de classer les données suivant trois dimensions : le modèle mathématique d'échelle de mesure (essentiellement échelles nominale, ordinale, d'intervalle ou de rapport) [Stevens, 1974] l'origine objective ou subjective des données et les imperfections des données (données manquantes, bruitées, ...).

4) L'analyse statistique des données et la présentation des résultats sous formes de connaissances exploitables par l'utilisateur final : l'ingénieur, l'économiste, le médecin ...

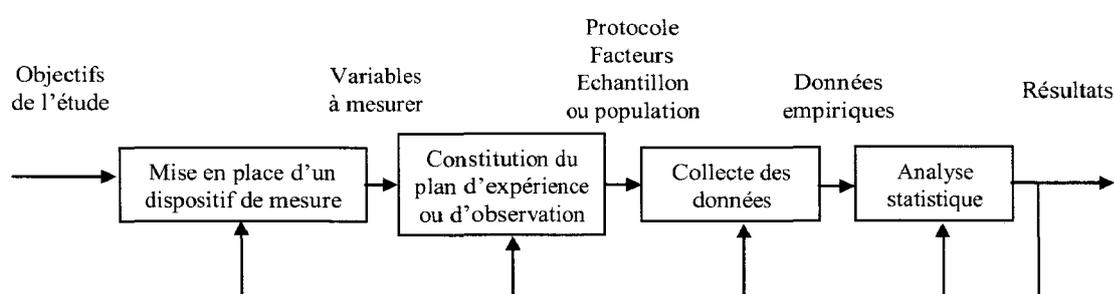


Figure 13 : Acquisition progressive de connaissances sur le système étudié à partir d'une approche statistique. [Loslever *et al*, 1997]

Pour chaque étape, des rebouclages, sont souvent nécessaires, ce qui met en exergue la multiplicité des objectifs possibles sur un plan statistique pour une même étude. Focalisons-nous sur la dernière étape : l'analyse statistique.

4 L'analyse statistique

A l'issue de la phase de collecte des données, le chercheur se trouve face à une grande base de données MFMV avec, au moins, deux facteurs : l'individu et le temps. Appelons $H0$ cette base de données initiale. Elle peut être structurée selon un hyperparallélépipède dont les directions correspondent à certains facteurs. Dans la suite, afin d'alléger les notations du terme générique de la base MFMV $H0$, nous ne considérerons que $U=3$ facteurs : i, j et k . Dans ce cas, $H0$, peut être vue comme un parallélépipède à $H0$ cases, chacune d'elles correspondant aux combinaisons de modalités de facteurs. Le nombre maximum de cases susceptibles d'exister est $H0=H*I*J*K$. Bien entendu, certaines combinaisons de facteurs peuvent ne pas exister notamment dans le cas d'un plan d'expérience où chaque individu i ne teste pas toutes les paires (j,k) . Dans la suite, $H0$ sera le nombre de cases non vides ($H0 \leq H$). Chaque case non vide de $H0$ correspondant à un triplet (i,j,k) contient un ensemble de données

temporelles (exemple : un signal multidimensionnel dont les composantes sont relatives à la vitesse du véhicule, l'angle au volant...) et de données non-temporelles (exemple : réponses à un questionnaire). Dans la suite, nous ne nous focaliserons que sur des variables temporelles. Avec notre exemple, le triplet (i,j,k) génère, pour la composante v , l'ensemble $\{y_{ijk,v}; v=1, \dots, V_0; l=1, \dots, L_{ijk,v}\}$, l désignant l'échantillon temporel.

H_0 est très rarement utilisable tel quel puisque l'utilisation d'une méthode statistique nécessite une structure de donnée particulière en entrée, essentiellement des tableaux à deux dimensions. Avant d'appliquer une méthode statistique, il est donc nécessaire d'effectuer différentes opérations (figure 14) qui ont chacune pour effet de traiter les données de manière à réduire la perte des informations pertinentes et d'extraire un maximum de phénomènes comportementaux [Loslever *et al*, 1997].

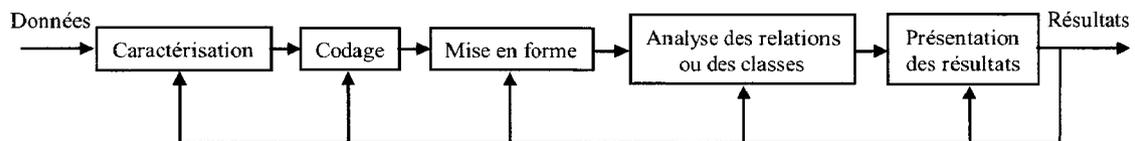


Figure 14 : Principe de transformation des données et analyse statistique en vue d'extraire des connaissances.

4.1 Caractérisation des données

La caractérisation comporte 2 sous-étapes : la vérification et le filtrage des données, puis la construction de nouvelles variables pertinentes à partir des variables mesurées et la création d'indicateurs synthétisant ces nouvelles variables.

4.1.1 Vérification et filtrage des données

En général, étant donné la multitude de signaux multidimensionnels (H_0 est souvent de l'ordre de plusieurs centaines) et le nombre élevé de composantes par signal (V_0 de l'ordre de plusieurs dizaines), un objectif préliminaire devrait être systématiquement fixé, à savoir vérifier que les données ne présentent pas de valeurs douteuses [Girard, 2007]. Si l'observation de chaque composante de chaque signal multidimensionnel est fastidieuse, il n'en est pas de même pour les histogrammes d'amplitudes. Ces derniers permettent de montrer la plage de variation, donc la présence de valeurs anormalement trop petites ou trop grandes, la présence de classes (sous forme de modes), sachant que ces classes peuvent provenir d'un dysfonctionnement de mesure ou d'un phénomène rare. Si ces variables ne sont

pas conformes à ce qui était attendu (ex : défaut de capteur, problème de câblage des électrodes pour des mesures physiologiques), elles seront supprimées de la base de données. Il en va de même pour celles qui ont été enregistrées mais qui n'ont plus un grand intérêt pour l'analyse (ex : état de la boîte de vitesse). Notons $V0s$ le nombre de variables supprimées.

Ensuite, lors des opérations de mesure, les données peuvent être bruitées, il est donc essentiel de les filtrer afin d'éliminer ce bruit et dans certains cas les ré-échantillonner [Bellanger, 2006].

La base de données $H0$ devient donc $H1$ avec dans la plupart des cas, $H0=H1$ si aucun triplet n'a du être éliminé pour les raisons évoquées ci-dessus. Le nombre de variables $V0$ devient $V1=V0-V0s$.

4.1.2 Construction de nouvelles variables temporelles et d'indicateurs

A partir de l'ensemble initial des variables $V0$, il est possible de calculer de nouvelles variables pertinentes pour les besoins de l'analyse comme par exemple, le temps avant sortie de voie TLC ou le temps avant collision TTC [Kiefer *et al*, 2005]. Si $V0n$ est ce nombre de nouvelles variables, il existe donc $V1=V0-V0s+V0n$ variables à considérer pour le reste de l'analyse.

Souvent, chacune de ces $V1$ variables temporelles est résumée à l'aide de N indicateurs, ce qui forme $V2=N*V1$ variables, dites « de l'analyse » [Loslever *et al*, 1997]. Dans la plupart des cas, chaque variable est considérée sur la globalité du signal, donc avec $N=1$ indicateur, par exemple la moyenne arithmétique ou la valeur maximale atteinte ; ou $N=2$ indicateurs, par exemple le couple moyenne arithmétique / écart-type. Elles peuvent aussi être résumées localement lorsque les indicateurs sont calculés dans des fenêtres temporelles ($N>2$).

En résumé, cette étape de l'analyse statistique a transformé l'ensemble initial de données en un nouvel ensemble, dans lequel l'aspect temporel est « plus ou moins » présent. $H1$ devient donc $H2$, avec dans la plupart des cas $H2=H1$. Si on garde notre cas avec $U=3$ facteurs, pour un plan d'expérience avec $H=I*J*K$ combinaisons possibles, chaque triplet (i,j,k) génère l'ensemble $\{y_{2_{ijk,v}}; v=1, \dots, V2\}$.

Dans la perspective d'une approche statistique monovariante, les méthodes statistiques telles que le test d'hypothèses d'effets de facteurs expérimentaux peuvent directement être

appliquées après cette étape de caractérisation. Par contre, dans l'optique d'une approche multivariable visant à conserver les aspects temporels, une étape supplémentaire de codage peut s'avérer nécessaire, notamment si les échelles de mesure sont différentes.

4.2 Codage des données

Cette étape de codage des données est nécessaire si l'analyse requiert en entrée une échelle différente de l'échelle initiale. Comme les variables peuvent être de différentes natures, par exemple d'unités physiques différentes, cette étape permettra d'obtenir la même échelle.

En présence d'une, voire deux variables, il est possible de transformer une échelle quantitative en échelle ordinale pour pouvoir utiliser, par exemple, des tests non-paramétriques [Lebart *et al*, 1982].

En présence de plusieurs variables, l'opération de normalisation qui consiste souvent à centrer autour de la moyenne arithmétique et à réduire par l'écart-type permet d'utiliser l'analyse en composantes principales ou la classification hiérarchique [Lebart *et al*, 1995].

Dans la plupart des cas, une méthode d'analyse peut être appliquée directement après cette étape de codage, notamment quand la structure de données est un tableau à deux entrées, comme un tableau croisant des échantillons temporels et des variables quantitatives. Néanmoins, dans certains cas, la structure de données est plus complexe (cas de $H2$, par exemple) ; il faut alors la modifier de façon à ce qu'elle puisse être injectée en entrée de la méthode d'analyse statistique.

4.3 Mise en forme des données

En général, les données sont mises dans un tableau à plusieurs entrées, comme un tableau à deux dimensions [Lebart *et al*, 1995], par exemple :

- Un *tableau individus x variables*. Les R lignes correspondent aux observations (échantillons temporels, fenêtres temporelles, individus, ...) et les C colonnes aux variables.

- Un *tableau de contingence* (ou de *correspondance*). Les lignes et les colonnes correspondent respectivement aux R et C modalités de 2 variables qualitatives. Le tableau contient des effectifs relatifs aux $R \times C$ paires de modalités.
- Un *tableau de correspondance multiple*. Si en présence de V variables qualitatives, le nombre total de modalités est M , on construit un tableau donnant les effectifs de toutes les paires de modalités, donc un tableau symétrique avec $R=M$ et $C=M$.
- Un *tableau disjonctif complet*. Toujours avec V variables qualitatives, R =nombre d'observations et $C=M$, le tableau contenant des 0 ou des 1 selon que la modalité est prise ou non (sachant qu'une seule modalité peut être prise pour une variable).
- Un *tableau de valeurs d'appartenance*. On reprend le cas précédent mais l'appartenance à une modalité est comprise entre 0 et 1 [Benzécri, 1984].

4.4 Analyse des relations ou des classes

Cette quatrième étape couvre essentiellement deux analyses :

- L'étude des relations entre les $V/2$ variables et/ou les influences des U facteurs sur les $V/2$ variables.
- La recherche de classes au sein de l'ensemble des $V/2$ variables et/ou au sein de l'ensemble des $H/2$ triplets (i,j,k) .

Plusieurs dimensions taxinomiques (figure 15) permettent de distinguer les différentes méthodes statistiques [Loslever, 2000] :

- L'aspect *probabiliste* est introduit ou non introduit dans le modèle statistique. Si c'est le cas, on se situe alors dans le contexte de la statistique inférentielle. Si les résultats sont obtenus uniquement à partir des données disponibles, on se situe dans le contexte de la statistique descriptive. [Sprent, 1989] [Mc Gee, 1971]
- L'aspect *temporel* est introduit ou non introduit dans le modèle statistique, c'est-à-dire qu'il conserve essentiellement l'aspect chronologique, par exemple un modèle de type $y(t)=at+b$ ou $y_n=ay_{n-1}+b$. [Pandit et Wu, 1993]
- L'aspect multivariable est introduit ou non introduit dans le modèle statistique. En présence de N variables, on peut opposer les deux démarches extrêmes suivantes : une analyse N -variée (multivariée) ou N analyses univariées (monovariées),

l'analyse multivariée étant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre. [Boughettaya et Le Viet, 1998] [Johnson et Wichern, 1992]

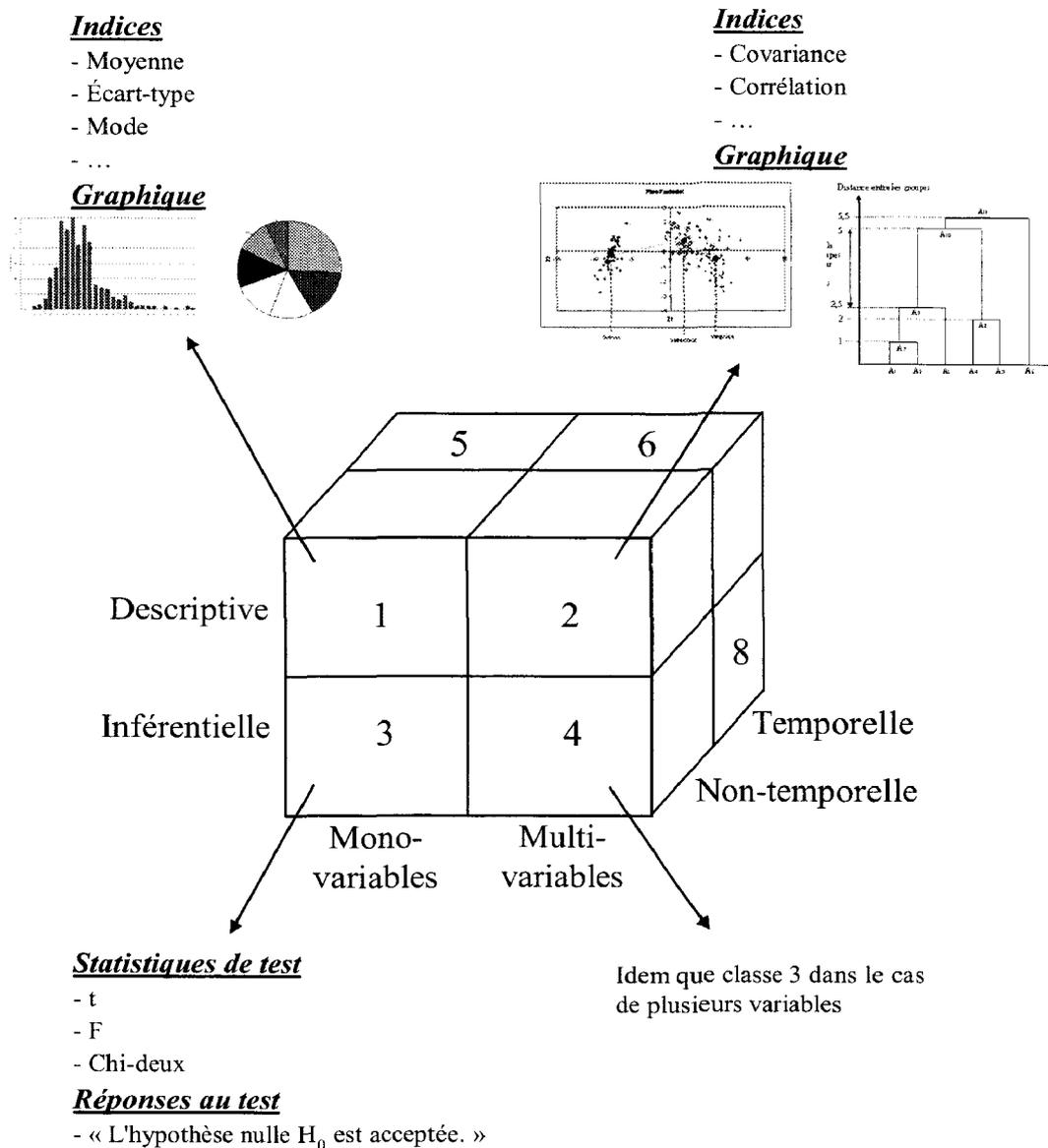


Figure 15 : Une façon de classier les méthodes d'exploitation des données.

Les 8 familles de méthodes produisent des « sorties » où un, deux ou trois types de modèles sont présents parmi les modèles mathématiques (équation de récurrence, modèle régressionnel), graphiques (histogramme, plan factoriel, ...) ou verbaux (texte rédigé suite à la lecture des sorties d'une méthode factorielle, résultat d'un test d'hypothèse). Souvent, une étape finale s'impose : la présentation des résultats.

4.5 Présentation des résultats

Mentionner cette étape est important pour deux raisons essentielles.

D'une part, les méthodes utilisées dans l'étape précédente peuvent produire des résultats relativement complexes, et donc difficilement compréhensibles par la personne qui connaît peu, voire pas, la méthode. C'est notamment le cas des méthodes factorielles qui fournissent des tableaux et des graphiques dont la lecture est peu aisée. C'est pourquoi, il est nécessaire de présenter les résultats de manière plus intelligible pour le lecteur.

D'autre part, même pour des méthodes dont les résultats sont plus simples, il importe de s'attacher à soigner la présentation des graphiques. C'est notamment le cas des dessins qui montrent les effets des facteurs sur les variables ou des arbres hiérarchiques.

Quelque soit le cas, l'idée de base est alors de s'inspirer des outils graphiques suggérés par les spécialistes [Bertin, 1977] et [Tufté, 1983] tout en s'attachant à suivre les recommandations des spécialistes de l'ergonomie des interfaces homme-machine [Gillian *et al*, 1998]. Un exemple de suggestion serait de représenter les facteurs ou les variables en utilisant des icônes, par exemple « le fait de mettre son clignotant gauche » serait représenté par l'icône « < ».

Dans les paragraphes précédents, nous avons expliqué chacune des parties de l'analyse statistique. Comme la caractérisation est la première étape de l'analyse, elle va donc conditionner les résultats. C'est pour cela que cette étape nécessite une attention particulière.

5 La caractérisation fondée sur un découpage spatio-temporel

5.1 Caractérisation

Souvent, vu la grande complexité ($U > 3$ et $V_0 > 20$) et la gigantesque taille (plusieurs giga-octets) d'une structure MFMV de type *HI*, on peut être tenté de résumer fortement les signaux multidimensionnels. Parmi les innombrables possibilités [Loslever, 2001], une possibilité de synthèse de l'information est de passer par le calcul de la moyenne arithmétique:

$$\{y1_{ijkl,v}, l = 1, \dots, LI_{ijk,v}\} \rightarrow y2_{ijk,v} = \frac{1}{LI_{ijk}} \sum_{l=1}^{LI_{ijk}} y1_{ijkl,v} \quad (1) \text{ de la figure 17}$$

où $LI_{ijk,v}$ est le nombre de valeurs temporelles issues de la phase filtrage/rééchantillonnage. Donc $LI_{ijk,v}$ valeurs temporelles sont remplacées par une seule valeur (ou 2 valeurs si l'écart-type est pris en compte, par exemple). Mais de nombreuses alternatives, moins réductrices de l'information peuvent être utilisées, comme par exemple le découpage temporel.

5.1.1 Découpage temporel

Dans le chapitre 1, nous avons vu que les différentes études en conduite automobile étaient basées sur des durées différentes allant de quelques secondes à plusieurs années. Il est intéressant de ne pas résumer les données sur la durée totale afin de mettre en évidence des phénomènes intéressants, mais aussi d'avoir des intervalles de temps communs pour chaque ensemble de données afin de pouvoir comparer les individus entre eux. C'est dans cet objectif qu'intervient le découpage (ou fenêtrage) temporel. Reprenons notre exemple avec $U=3$ facteurs :

- Dans $H1$, chaque triplet (i,j,k) contient $LI_{ijk,v}$ échantillons temporels.
- Dans $H2$, chaque triplet (i,j,k) peut être décrit par une suite de fenêtres temporelles. Il importe de mentionner que le nombre de fenêtres temporelles peut être constant (ex : signal découpé en 5 fenêtres temporelles) au sein de $H2$ ou variable. Ce second cas correspond à une situation où la durée de chaque fenêtre est définie a priori (par exemple une seconde). Le nombre de fenêtres dépendra alors de la durée du signal.

Dans le but de simplifier les notations, considérons le premier cas et notons par T le nombre de fenêtres temporelles. Si on suppose que la fréquence d'échantillonnage est la même pour chaque variable v ($LI_{ijk,v}$ est remplacé par LI_{ijk}), le triplet (i,j,k) contient donc un ensemble de $LI_{ijk} * T$ valeurs d'appartenance temporelles, avec comme terme générique $\mu_t(l)$, qui correspond à la valeur d'appartenance de chaque échantillon temporel l ($l=1, \dots, LI_{ijk}$) pour la fenêtre t ($t=1, \dots, T$).

La définition des frontières entre deux fenêtres mitoyennes peut se faire de deux façons : un découpage binaire ($\mu_t(l) = \{0;1\}$) ou un découpage flou ($\mu_t(l) = [0;1]$). Le choix du découpage flou peut s'avérer préférable quand la frontière entre deux fenêtres est difficile à déterminer. Par exemple, (Loslever et al. 2004) découpe le lever de charge en dix fenêtres

temporelles floues à cause de l'incertitude commise sur la détection des instants initiaux et finaux. Si on veut faire un parallèle avec (1), on peut noter cette caractérisation par :

$$\{y1_{ijkl,v}, l = 1, \dots, L1_{ijk,v}\} \rightarrow \{y2_{ijkt,v} = \frac{1}{\sum_{l=1}^{L1_{ijk,v}} \mu_l(l)} \sum_{l=1}^{L1_{ijk,v}} \mu_l(l) \times y1_{ijkl,v}, t = 1, \dots, T\} \quad (2)$$

17

où T est le nombre de fenêtres temporelles. Donc $L1_{ijk,v}$ valeurs temporelles sont remplacées par T valeurs. Notons que si les fenêtres temporelles sont floues, ceci revient à calculer T moyennes glissantes.

5.1.2 Découpage spatial

De la même façon que le découpage temporel, il est possible de découper les $V1$ variables temporelles ou les $V2$ indicateurs en intervalles. En effet, les variables temporelles étant quantitatives mais hétérogènes, le découpage spatial permet de les rendre homogènes. En outre, le signal multidimensionnel peut comporter des composantes supportées par une échelle qualitative (état du clignotant, de la boîte de vitesse, ...). En présence de variables quantitatives, deux questions se posent alors : le choix du nombre de modalités et le critère de découpage des fenêtres spatiales [Loslever, 2002].

Considérons par exemple la position latérale de la voiture sur la chaussée. Cette variable peut-être découpée en fenêtres, chacune correspondant à une position physique sur la chaussée. Par exemple, on peut considérer les 5 fenêtres suivantes : l'extrême gauche, la voie de gauche, le milieu de voie, la voie de droite et l'extrême droite (figure 16).

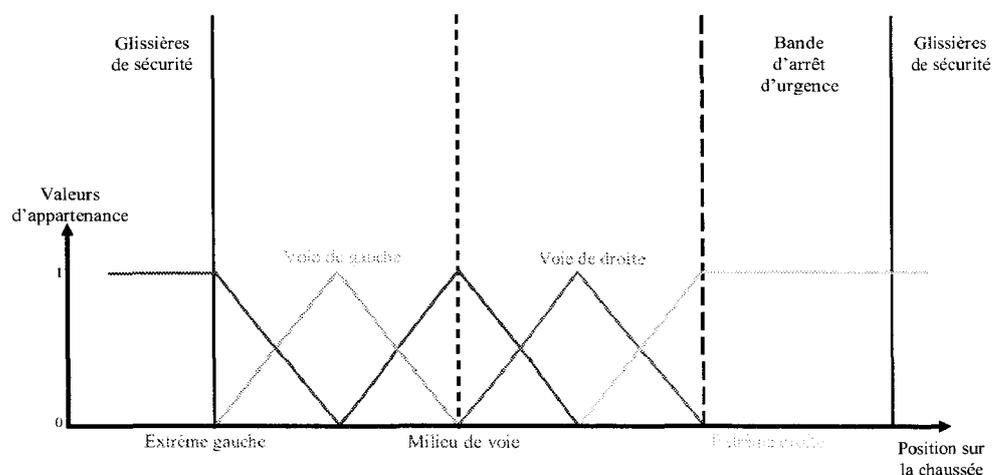


Figure 16 : Fenêtrage spatial pour la position latérale sur une autoroute à 2*2 voies.

En reprenant les mêmes notations qu'avec (1) et (2), on peut exprimer la caractérisation sous la forme suivante :

$$\{y1_{ijkl,v}, l = 1, \dots, L1_{ijk,v}\} \rightarrow \{y2_{ijk,vs} = \frac{1}{L1_{ijk,v}} \sum_{l=1}^{L1_{ijk,v}} \mu_s(y1_{ijkl,v}), s = 1, \dots, S_v\} \quad (3) \text{ de la figure 17}$$

où S_v est le nombre de fenêtres spatiales pour la variable v . Donc $L1_{ijk,v}$ valeurs temporelles sont remplacées par S_v valeurs. Notons que si les fenêtres spatiales sont non floues, ceci revient à calculer S_v fréquences, la représentation graphique de l'ensemble donnant l'histogramme d'amplitude.

5.1.3 Découpage spatio-temporel

Il est possible de combiner découpage temporel et découpage spatial. De la même façon que (1) (2) (3), on peut exprimer la caractérisation sous la forme :

$$\{y1_{ijkl,v}, l = 1, \dots, L1_{ijk,v}\} \rightarrow \{y2_{ijkt,vs} = \frac{1}{\sum_{l=1}^{L1_{ijk,v}} \mu_t(l)} \sum_{l=1}^{L1_{ijk,v}} \mu_t(l) \times \mu_s(y1_{ijkl,v}), t = 1, \dots, T, s = 1, \dots, S_v\}$$

(4) de la figure 17

où T est le nombre de fenêtres temporelles et S_v est le nombre de fenêtres spatiales pour la variable v . Donc $L1_{ijl,v}$ valeurs temporelles sont remplacées par $T*S_v$ valeurs.

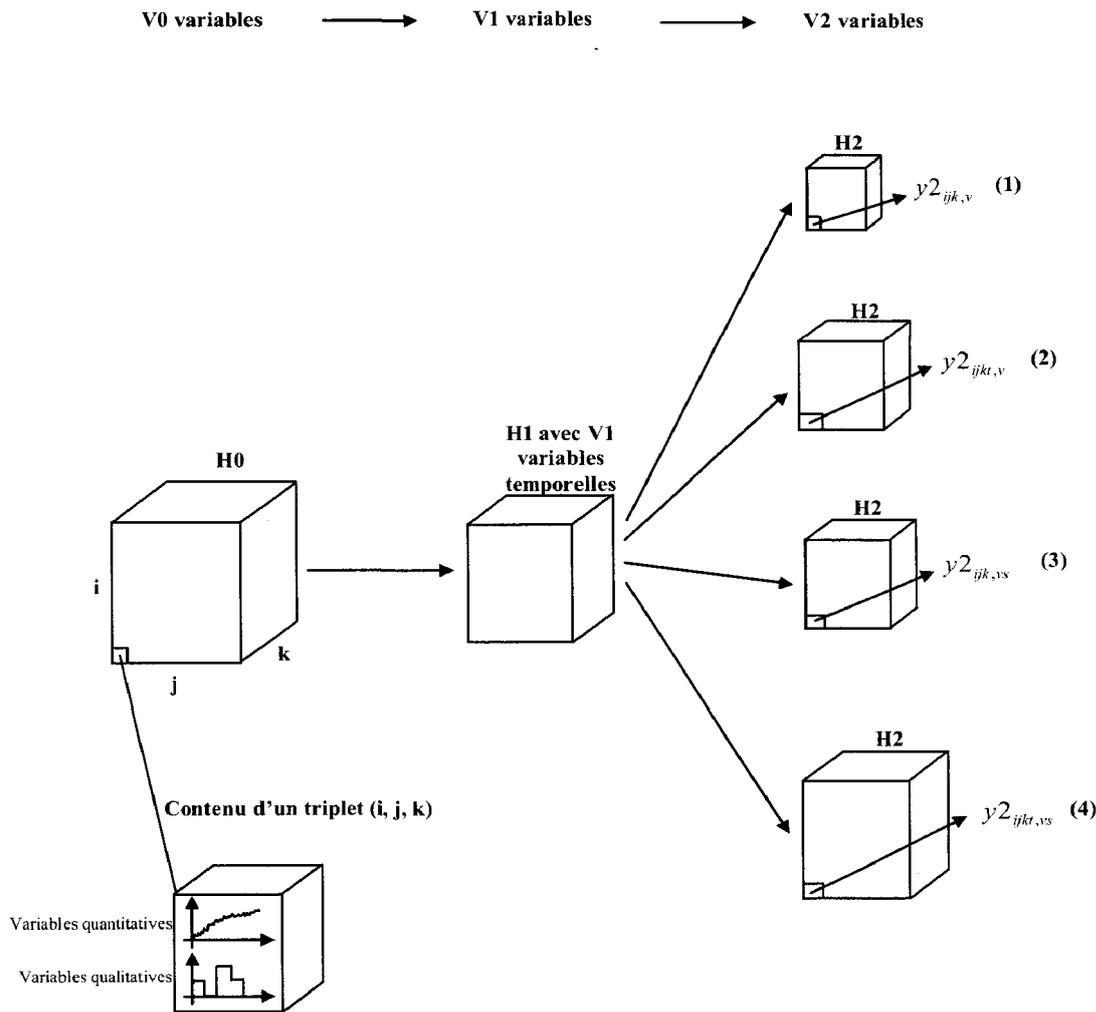


Figure 17 : Différentes façons de caractériser les données temporelles.

Quelques méthodes pour l'étape de caractérisation viennent d'être présentées, elles ont permis de rendre les données homogènes, l'étape de codage n'est donc pas nécessaire. Passons à l'étape 3 de mise en forme des données.

5.2 Mise en forme

Le tableau pour le fenêtrage temporel est un tableau à deux entrées composé des valeurs d'appartenance de chaque échantillon temporel aux fenêtres temporelles. Pour simplifier les notations, supprimons le « v » en indice. Dans notre exemple avec $U=3$ facteurs et T fenêtres temporelles, chaque triplet (i,j,k) génère un tableau de TMV appelé T_{ijk} , dont chaque ligne r correspond à chaque échantillon temporel l ($l=1, \dots, Ll_{ijk}$) et chaque colonne c correspond à la fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T$). Donc, $T_{ijk}(r,c)=\mu_l(t)$. Ce tableau comprend donc Ll_{ijk} lignes et T colonnes.

De la même façon, le tableau pour le fenêtrage spatial est un tableau à deux entrées composé des valeurs d'appartenance aux fenêtres spatiales. Dans notre exemple avec $U=3$ facteurs et S_v fenêtres spatiales, chaque triplet (i,j,k) génère un tableau de SMV appelé S_{ijk} , dont chaque ligne r correspond à chaque échantillon temporel l ($l=1, \dots, LI_{ijk}$) et chaque colonne c correspond à la fenêtre spatiale s ($s=1, \dots, S_v$) pour chaque variable temporelle v ($v=1, \dots, VI$). Donc, $S_{ijk}(r,c) = y_{2_{ijk,vs}}$. Ce tableau comprend donc LI_{ijk} lignes et $S = \sum_{v=1}^{VI} S_v$ colonnes.

Les fenêtrages temporel et spatial donnent une série de tableaux à deux entrées constitués des valeurs d'appartenances spatio-temporelles. Chaque triplet (i,j,k) génère donc un tableau de STMV appelé ST_{ijk} avec $ST_{ijk} = T'_{ijk} * S_{ijk}$ où T'_{ijk} est la transposée de T_{ijk} , dont chaque ligne r correspond à chaque fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T$) et chaque colonne c correspond à la fenêtre spatiale s ($s=1, \dots, S_v$) pour chaque variable v ($v=1, \dots, VI$). Donc, $ST_{ijk}(r,c) = y_{2_{ijkt,vs}}$. Ce tableau comprend donc T lignes et S colonnes. Cette étape de mise ne forme est illustrée à la figure 18.

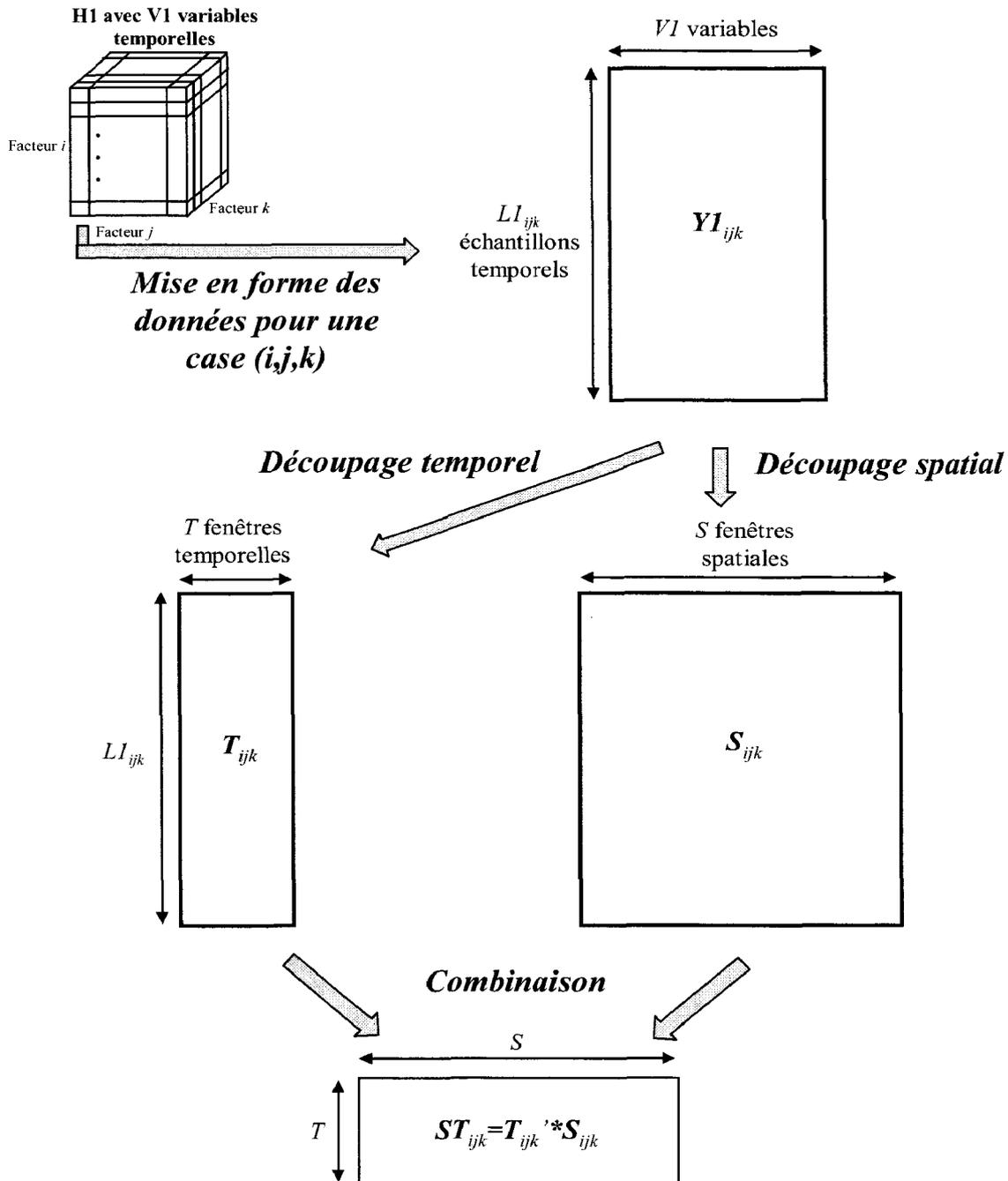


Figure 18 : Mise sous forme de tableaux à deux entrées avec un découpage spatio-temporel et $U = 3$ facteurs.

Dans cet exemple, nous avons tenu compte de chaque case de HI donc de chaque triplet (i,j,k) , figure 17. Dans l'optique d'étudier l'influence des facteurs (dont le facteur temps), il est alors tout à fait possible de moyenner sur un ou plusieurs facteurs. Par exemple, si on prend la convention usuelle consistant à indiquer une sommation sur un indice en le remplaçant par un point (« . »), on peut avoir:

- avec un seul facteur la notation $(.j,k,t)$, $(i.,k,t)$, $(i,j.,t)$, $(i,j,k.)$.

- avec deux facteurs, par exemple $(.,j,k,.)$ si on veut moyenner sur le facteur individu et sur le facteur temps.
- avec trois facteurs, par exemple $(.,.,k,.)$ si on veut moyenner sur les facteurs individu, j et temps.

Gardant à l'esprit l'existence de $H2$ cases non vides, les ensembles de données relatives à chaque case (i,j,k) , figure 18, peuvent être organisés, dans un premier temps, selon un *grand* tableau Z , figure 19a, pouvant être vu comme suit :

- selon les colonnes, de gauche à droite, Z contient l'identificateur de la ligne, puis les valeurs des facteurs, puis les valeurs « physiques » (vitesse, distance, clignotant, ...) et enfin les valeurs d'appartenance aux fenêtres spatiales.
- selon les lignes, de haut en bas, Z contient l'identificateur des colonnes puis les fenêtres temporelles de toutes les cases (i,j,k) de $H2$.

En résumé, si on ne prend pas en compte les identificateurs de ligne et de colonne, Z est la juxtaposition de plusieurs tableaux qui peut être notée comme suit :

$$Z=[X \ Y2 \ ST] = [Z_{111} ; Z_{112} ; \dots ; Z_{IJK}]$$

où un espace entre 2 tableaux signifie qu'ils sont l'un à côté de l'autre, et un « ; » signifie qu'ils sont l'un sous l'autre (notation inspirée de Matlab qui a servi à les construire). Ensuite, les tableaux contenant des valeurs moyennées, figure 19.a et 19.b par exemple, peuvent être placés sous Z .

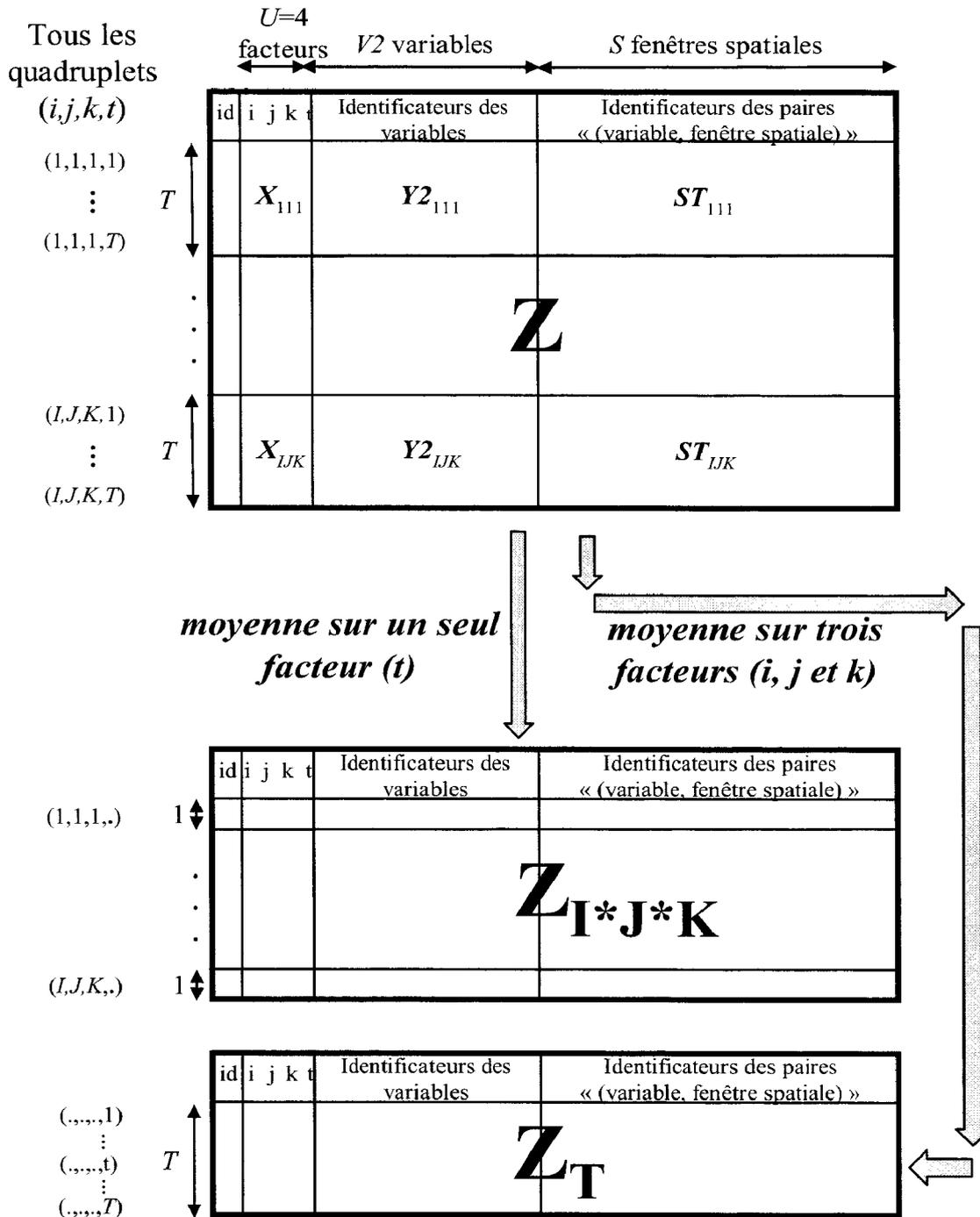


Figure 19 : Exemples de façon d'organiser toutes les données dans $\mathbb{H}2$ (cf. figure 18), selon des tableaux à 2 entrées : a) tableau contenant toutes les données temporelles, b) tableau où on moyenne sur un facteur (par exemple t), tableau où on moyenne sur 3 facteurs (par exemple i, j et k).

5.3 Analyse des relations ou des classes

Compte tenu de la série de tableaux ainsi obtenue et des familles de méthodes présentées figure 15, de nombreux chemins de l'analyse statistique peuvent être empruntés,

un chemin étant la succession de 5 étapes, cf. figure 14. Dans le contexte d'une analyse gardant les aspects MFMV inhérents à toute base de données issue d'une étude expérimentale du système conducteur-véhicule-environnement, citons deux chemins possibles.

Le premier passe par une analyse descriptive (case 2 de la figure 15). Par exemple, l'Analyse en Composantes Principales qui peut être appliquée au tableau des valeurs physiques *Y2* ou encore l'analyse des Correspondances Multiples avec le même principe mathématique (changement de base de manière à optimiser un critère quadratique) qui peut être utilisée avec le tableau des valeurs d'appartenance *ST*. Ces méthodes ont l'avantage de vérifier les données puisque différents pré-traitements sont nécessaires avant de les appliquer.

Le second passe par une analyse inférentielle (case 4 de la figure 15). Ces méthodes sont peu utilisées puisque leur interprétation est souvent complexe. Les chercheurs préfèrent donc appliquer plusieurs fois un test mono-varié (case 3 de la figure 15). De plus, la base de données étant une très grande base pour l'étude de notre système, il est difficile d'émettre des hypothèses et de les tester.

C'est pour cette raison qu'il semble judicieux de passer par une analyse descriptive, qui fera ressortir de la base de données *H2* les éléments les plus intéressants. Ensuite, il est tout à fait possible de revenir à des tests mono-variés pour confirmer les résultats trouvés lors de l'analyse précédente (case 3 de la figure 15).

Les plans factoriels issus des méthodes descriptives sont souvent difficilement compréhensibles pour une personne qui ne maîtrise pas cette méthode. Pour une lecture plus aisée, il serait intéressant de présenter les résultats sous une forme moins compliquée, par exemple un graphique montrant la relation entre deux variables (case 1 de la figure 15).

Quels outils sont disponibles pour mettre en œuvre ces méthodes ?

6 Outils Informatiques et Statistiques

Suite à la phase de collecte des données, se pose le problème du choix du (des) outils(s) informatiques en vue de leurs exploitations. En effet, la base de données générée tout au long du plan d'expérience sur un système à composante humaine est souvent de très grande taille (plusieurs centaines de méga-octets) et complexe (présence de données temporelles et non temporelles, supportées par des échelles qualitatives et quantitatives...). Vu le rôle primordial

qu'ils jouent en aval de la phase de collecte des données, il importe donc de se pencher sur les Outils Informatiques et Statistiques (OIS) susceptibles de répondre au problème de l'analyse statistique. Globalement, on peut proposer la taxinomie suivante :

- **C1. Les systèmes de gestion de base de données (SGBD).** Via des requêtes, ils permettent de gérer de très grands ensembles de données avec la possibilité de faire des synthèses sous formes de tableaux ou de graphiques. Toutefois, peu de méthodes statistiques « avancées » sont initialement disponibles.
- **C2. Les tableurs.** La taille des données est nettement plus réduite mais ils comportent de nombreuses méthodes statistiques très utilisées dans le monde industriel et de l'ergonomie. Les méthodes directement disponibles, ou facilement mises en œuvre via des macros, sont les graphiques, les résumés statistiques et les tests inférentiels paramétriques et non paramétriques [Georgin et Gouet, 2005] [Georgin, 2007]. Il faut souligner la présence de logiciels avec de très nombreuses fonctions avancées (méthodes multidimensionnelles, régression multiple, étude des séries temporelles, ...), souvent écrits en C++, et interfacés avec un tableur, comme Xlstat.
- **C3. Les outils généralistes pour l'ingénieur.** Ils reposent sur un langage de programmation spécifique et sur des « boîtes à outils » plus ou moins complètes de statistique (Matlab, Scilab, Labview, Mathematica, ...).
- **C4. Les outils spécifiques en statistique.** Ils sont nombreux et peuvent se distinguer en diverses sous catégories comme les logiciels « sans programmation » (C4a avec Statlab, Statistica, Statview, SPAD, ...) et « avec programmation » (C4b avec SAS, Splus, R, SPSS...).

Les méthodes permettant une analyse MFMV étant relativement complexes au niveau du dépouillement des résultats, il est préférable, dans un premier temps, de se « faire la main » avec des OIS de type C4a, notamment du fait de leur forte interactivité et leurs grandes possibilités sur le plan graphique. Ceci étant, du fait de l'incompatibilité entre, d'une part, de grands ensembles de données souvent contenus dans des fichiers différents (cas des signaux multidimensionnels) et, d'autre part, les tableaux à 2 entrées nécessaires à la plupart des méthodes statistiques, des programmes d'adaptation (notamment de caractérisation et/ou codage) sont indispensables. Il faut alors recourir à des OIS de type C4b.

En conséquence, vu 1) notre méthodologie consistant à démarrer l'analyse statistique par une approche descriptive MFMV puis de la poursuivre avec une approche inférentielle, et 2) la disponibilité de certains OIS au LAMIH, nous nous appuierons sur le triplet « (Statlab, Matlab, R) ».

7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différentes étapes de l'analyse d'une base de données MultiFactorielles et MultiVariables. De multiples méthodes sont possibles à l'intérieur de chaque étape. Un choix doit donc être fait.

Parmi les innombrables méthodes de caractérisation possibles, quelques-unes ont été présentées dans le détail, il en ressort que le découpage spatio-temporel est le plus adapté pour étudier une telle base de données MFMV.

Ensuite, les méthodes d'analyse descriptive ont été retenues. Le choix s'est porté sur l'ACM plutôt que l'ACP puisqu'elle permet de mettre en évidence des phénomènes non linéaires et de mettre en relation des variables quantitatives et qualitatives. Un des gros avantages de ces méthodes est la possibilité de visualiser l'influence des facteurs en projetant en « illustratif » les lignes correspondant par exemple au tableau $Z_{I^*J^*K}$ (figure 19). Les résultats pourront être confirmés à l'aide de tests statistiques mono-variés et présentés à l'aide de graphiques simples.

Afin de mettre en application ces méthodes, nous avons choisi le triplet « (Statlab, Matlab, R) ». Le logiciel Statlab nous servira pour apprendre à utiliser les méthodes factorielles, Matlab pour la phase de caractérisation, codage et mise en forme des tableaux et enfin R pour la partie analyse avec les méthodes factorielles puis les méthodes inférentielles.

Pour mettre en œuvre ce chemin d'analyse, un recueil de données est nécessaire. La présentation de cette phase expérimentale fait l'objet du chapitre suivant.

III Expérimentation

1 Introduction

Le chapitre précédent nous a permis de déterminer une démarche d'analyse pour étudier le comportement du conducteur, en général, et donc lors de situations de dépassement en particulier. Dans ce chapitre, nous allons présenter toutes les étapes qui nous ont permis d'aboutir à la base de données expérimentale concernant le dépassement.

Cette expérimentation est le fruit d'une collaboration avec d'autres équipes du laboratoire : l'équipe de psychologie cognitive et celle de biomécanique (physiologie). L'équipe de psychologie cognitive est intervenue au niveau du recueil des données subjectives comme la conception des questionnaires et l'auto-confrontation a posteriori. L'équipe de biomécanique a contribué à la sélection des indicateurs électrophysiologiques et au déploiement du dispositif de recueil de ces données. La conception de l'expérimentation a nécessité de nombreuses heures de préparation et de réunions puisqu'il a fallu que les chercheurs de ces trois domaines se concertent et approuvent chacun des choix qui ont dû être faits.

Ce chapitre s'articule en deux parties. La première partie présente les aspects techniques (simulateur de conduite, parcours...) et le protocole expérimental (données recueillies, déroulement d'une passation, population...). La seconde partie concerne les premières étapes de transformation de la base de données initiale comme le filtrage ou encore la création de nouveaux indicateurs.

2 Aspects techniques et protocole expérimental

Nous avons choisi d'utiliser un simulateur de conduite pour d'une part contrôler toutes les conditions expérimentales afin qu'elles soient le plus reproductibles possible et, d'autre part, pour s'assurer de la sécurité du participant.

2.1 L'environnement matériel

Le simulateur dynamique SHERPA, acronyme de Simulateur Hybride d'Etude et de Recherche de PSA pour l'automobile, de l'université de Valenciennes est une réplique du simulateur du même nom situé à Vélizy. (Figure 20)

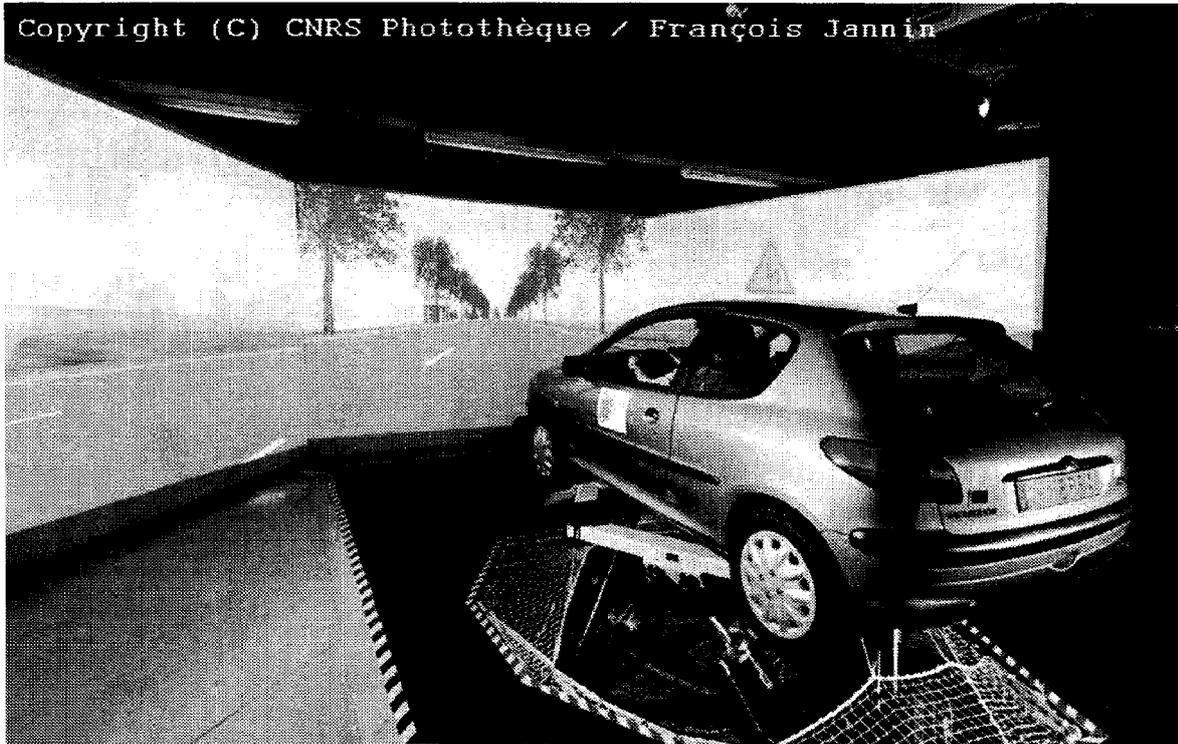


Figure 20 : Le simulateur de conduite SHERPA.

La cabine de conduite est constituée d'une Peugeot 206 totalement instrumentée : volant, pédales d'accélération, de frein et d'embrayage, boîte de vitesse à cinq rapports, planche de bord et commodos. L'environnement de simulation est restitué par l'intermédiaire de trois vidéo-projecteurs BARCO BarcoReality 6400 projetant sur trois écrans de 3.80*2.70m situés à l'avant du véhicule, trois images calculées dans une résolution de 1280*1024pixels. Ces écrans permettent d'offrir au conducteur un champ visuel de 180°. Les rétrovisions latérales et centrale sont assurées par trois écrans LCD Lilliput de sept pouces, remplaçant les trois rétroviseurs du véhicule. Afin d'accentuer le réalisme, un générateur sonore se charge de reproduire les bruits du moteur et de l'aérodynamique et le volant est doté d'un retour d'effort assuré par un moteur électrique produisant un couple limité à ± 10 Nm.

Depuis 2005, le simulateur est équipé d'une plate-forme six axes Hydraulique permettant de recréer les accélérations subies par le véhicule. Ce dispositif permet d'une part d'améliorer le réalisme de la simulation et d'autre part de diminuer les risques de malaises pouvant être provoqués par le simulateur en raison de la perception d'incohérences entre les informations visuelles et les informations de mouvement.

Le fonctionnement du simulateur (figure 21) est basé sur une boucle de fibre optique qui relie sept PC de contrôle et un « cluster » de six PC de génération d'images de synthèse.

Du fait de la présence de cartes à mémoire réflexive sur chaque équipement de la boucle, les informations générées sont visibles en même temps par tous les équipements. Ceci permet au cluster de lire les informations de commande (enfonceur de l'accélérateur, etc.), transmises sur la boucle par le *PC Interface Cabine*, pour pouvoir calculer ses images. En même temps, le *PC Son* récupère des variables véhicule, (régime moteur, position papillon ...) et trafic (véhicules, positions, vitesses) pour moduler le retour sonore : bruits du moteur, des véhicules du trafic et aérodynamiques.

Le *PC Interface Conducteur* permet de faire communiquer le conducteur et une aide à la conduite au moyen d'un écran LCD placé dans la cabine et d'un commodo d'autoradio.

Le *PC Magicien d'Oz* (nom venant de la technique dite du « Magicien d'Oz » qui est la simulation d'un système automatique par un opérateur humain) permet de prendre temporairement le contrôle d'un véhicule du trafic lors des expérimentations, facilitant la mise au point des situations routières : dépassements dangereux, déboitements intempestifs...

Le *PC Plate-forme* permet de mettre en mouvement la plate-forme six axes en synchronisant les mouvements de la cabine et les déplacements virtuels du simulateur.

Le *PC Synchro* permet de synchroniser toutes les données provenant des capteurs des véhicules, des magnétoscopes... Cette synchronisation est indispensable pour l'analyse de données.

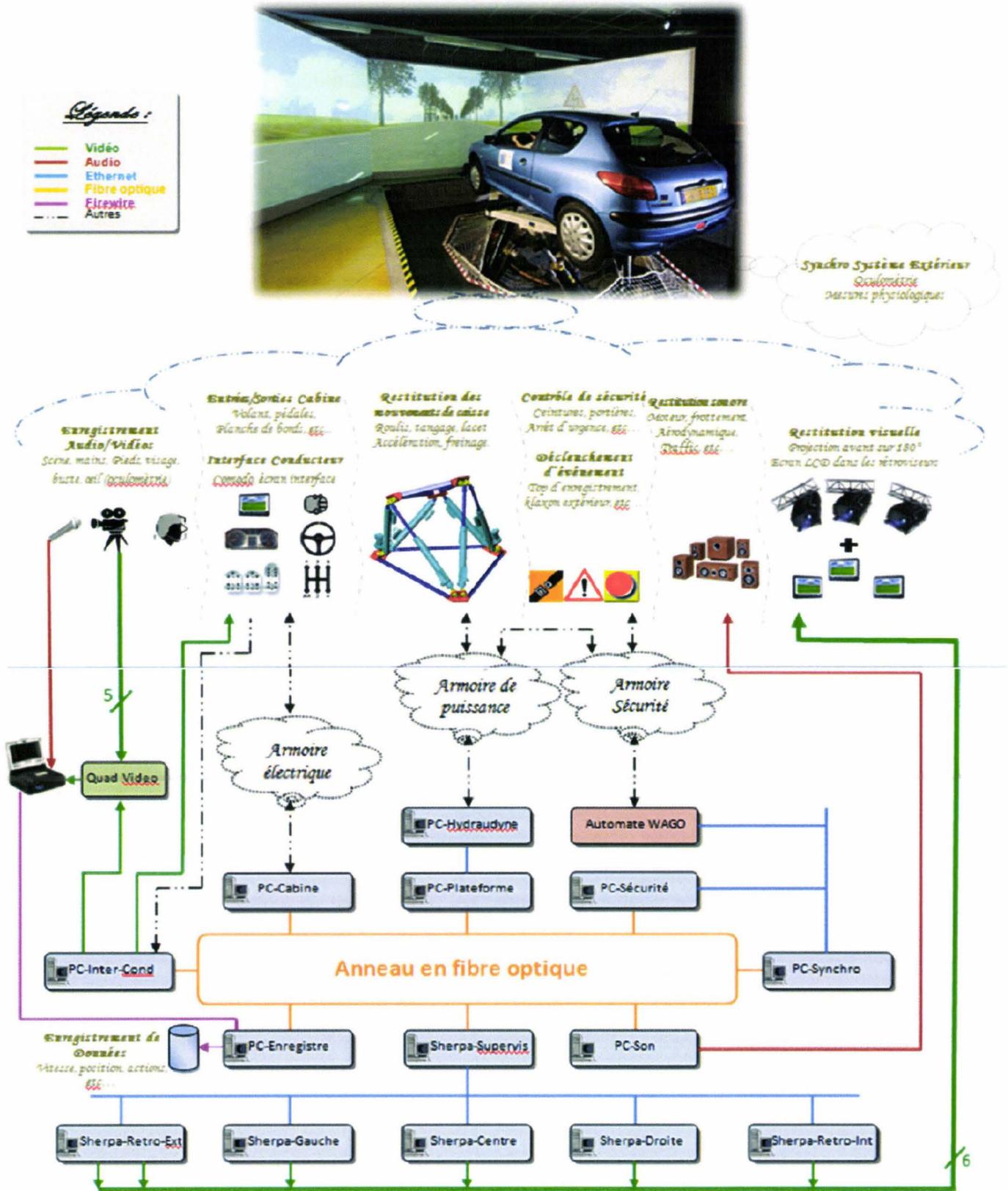


Figure 21 : Architecture du simulateur de conduite Sherpa.

Ce simulateur nous a permis de créer un environnement routier correspondant à nos besoins afin d'obtenir une base de données à analyser.

2.2 Le parcours expérimental

2.2.1 Les situations expérimentales

L'objectif est d'étudier le comportement du conducteur lors de situations de dépassement sur réseaux autoroutiers. La base de données à analyser doit être construite de manière à récolter assez d'informations pour répondre à cet objectif. La difficulté réside dans le choix du nombre de véhicules qui interagiront avec le conducteur, les modalités associées à chacun de ces véhicules et la façon de les mettre en scène.

Un choix concernant le nombre de véhicules qui interagiront avec le conducteur a du être fait avec les contraintes suivantes : choisir peu de véhicules n'est pas suffisant pour obtenir une grande diversité dans les situations de dépassement et choisir trop de véhicules engendre une grande combinatoire et les expérimentations seraient trop longues et trop monotones pour le participant. Un compromis a été trouvé : 3 véhicules interagiront dans l'environnement proche du conducteur (figure 22). Les paragraphes qui suivent détaillent le rôle de ces véhicules.

Le premier véhicule (VT1) sera placé devant le véhicule du participant et sa vitesse sera inférieure à la limitation de vitesse autorisée pour permettre au participant de le dépasser. Trois modalités de vitesse ont été choisies avec les mêmes contraintes que pour le choix du nombre de véhicules : 90 km/h dans le cas d'un véhicule très lent, 110 km/h dans le cas d'un jeune conducteur de moins de deux ans de permis et enfin une vitesse variable oscillant entre 90 et 110 km/h dans le cas d'un véhicule indécis.

Le second véhicule (VT2) sera placé derrière le véhicule du participant de manière à ce qu'il incite le participant à dépasser. Pour avoir une influence, il faut qu'il soit placé près du véhicule sujet. Nous avons donc retenu deux modalités : un véhicule extrêmement proche avec une interdistance de 0.5s et un véhicule proche avec une interdistance de 1.5s.

Quant au troisième véhicule (VT3), il devra gêner le véhicule du participant quand ce dernier souhaite dépasser le véhicule VT1. Il est caché derrière le véhicule VT2 et dépasse ces trois véhicules quand le véhicule du participant arrive à 150 mètres du véhicule VT1. Cette

distance a été choisie après plusieurs essais sur le simulateur de conduite car les distances entre la route réelle et un environnement simulé peuvent ne pas être perçues de la même façon.

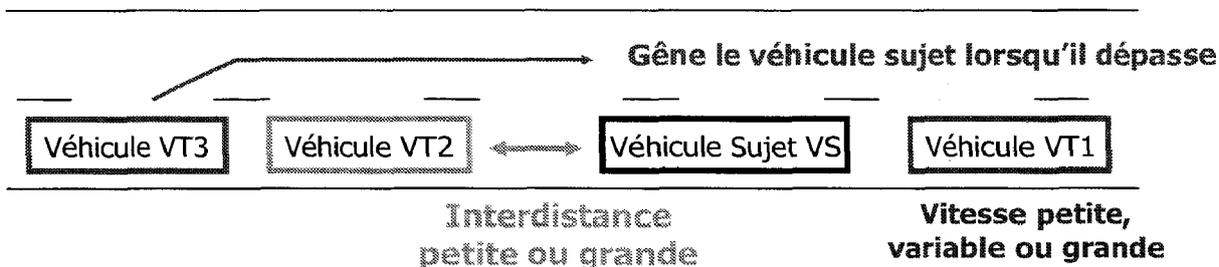


Figure 22 : Rôle des véhicules lors d'une expérimentation.

En combinant toutes ces modalités, 15 situations sont possibles :

- 3 situations mettant en interaction le véhicule sujet VS et le véhicule VT1
- 6 situations mettant en interaction le véhicule sujet VS et les véhicules VT1 et VT2
- 6 situations mettant en interaction le véhicule sujet VS et les véhicules VT1, VT2 et VT3

Type de situations	N° situation	Vitesse de VT1	Distance entre VS etVT2
I VS + VT1	1	P	-
	2	g	-
	3	v	-
II VS+VT1+VT2	4	P	p
	5	g	p
	6	v	p
	7	p	g
	8	g	g
	9	v	g
III VS+VT1+VT2+VT3	10		Idem que II
	11		
	12		
	13		
	14		
	15		

p = vitesse de 90 km/h ou interdistance de 0.5s
 g = vitesse de 110 km/h ou interdistance de 1.5s
 v = vitesse variable entre 90 km/h et 110 km/h

Tableau 1 : Liste des 15 situations expérimentales.

Ces situations sont contrebalancées de façon aléatoire de manière à éviter l'effet d'apprentissage. Elles interviendront dans l'ordre suivant : 10, 6, 1, 14, 7, 11, 4, 3, 13, 8, 15, 5, 2, 12, 9.

Une fois les situations expérimentales créées, il a fallu concevoir le dessin du parcours autoroutier.

2.2.2 Le parcours

Le parcours a été réalisé à l'aide du logiciel Evariste de la société Oktal. Il est de type autoroutier à 2*2 voies d'une longueur totale de 98 km. L'expérimentation compte quinze conditions expérimentales, ce qui génère une grande base de données. Pour ne pas la surcharger, le circuit est coupé en trois parties, chaque circuit fera donc intervenir cinq situations.

Pour des questions de réalisme, le circuit débute et se termine sur un péage ou une aire de repos.

Chaque situation expérimentale se déroule sur une zone de 5 kilomètres comprenant une ligne droite de 2 kilomètres et 2 virages (droite et gauche) de 1.5 kilomètres chacun. Ces virages à grand rayon de courbure sont utilisés d'une part pour éliminer toute influence du trajet sur le comportement des conducteurs et d'autre part, dans le but de rompre la monotonie du parcours. Ces 3 tronçons sont permutés afin d'éviter l'effet d'apprentissage.

Entre chaque condition expérimentale, une zone dite de réinitialisation est créée. Cette zone permet de créer les conditions initiales du trafic de manière la plus reproductible possible et également de forcer le conducteur à se replacer sur la voie de droite avec une vitesse de 90 km/h en utilisant par exemple, une bretelle de sortie.

2.3 Les données recueillies

Les données enregistrées sont nombreuses et de natures différentes : questionnaires, bandes vidéos, données physiologiques et données SHERPA.

2.3.1 Mesures directes

Les données issues du simulateur sont composées de trois ensembles de fichiers :

• Un fichier, nommé *VS*, contenant les enregistrements des actions du conducteur sur la cabine et les données liées au modèle numérique du véhicule :

- numéro de cycle SHERPA ;
- temps de simulation en seconde ;
- temps de simulation sous la forme HH:MM:SS:D ;
- vitesse du véhicule sujet en km/h ;
- régime moteur du véhicule sujet en tours/minute ;
- position de la pédale d'accélérateur en % ;
- position de la pédale de frein en % ;
- position de la pédale d'embrayage en % ;
- valeur de l'angle au volant en radians ;
- commande moteur du retour d'effort du volant en N.m ;
- état de la boîte de vitesse ;
- état des clignotants ;
- position en X de la plate-forme en mètres ;
- position en Y de la plate-forme en mètres ;
- position en Z de la plate-forme en mètres ;
- position en psi de la plate-forme en degrés ;
- position en téta de la plate-forme en degrés ;
- position en phi de la plate-forme en degrés.

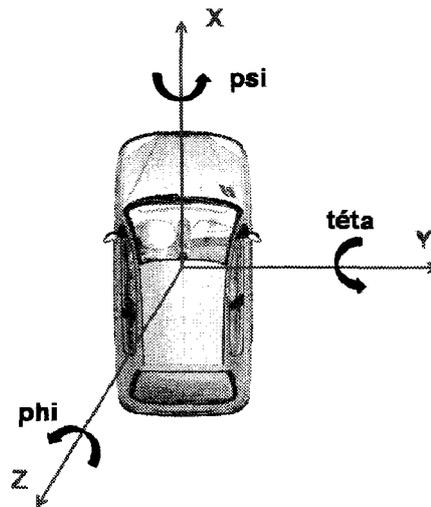


Figure 23 : Position en X, Y, Z, psi, téta et phi de la plateforme

• Un fichier, nommé *VT*, contenant les enregistrements des paramètres de chaque véhicule présent dans la simulation (y compris le véhicule sujet), les variables suivantes ont été enregistrées :

- numéro de cycle SHERPA ;
- temps de simulation en seconde ;
- temps de simulation sous la forme HH:MM:SS:D ;
- position selon X du repère global du circuit en mètres ;
- position selon Y du repère global du circuit en mètres ;
- abscisse curviligne en mètres ;
- écart latéral en mètres ;
- lacet en radians (angle entre le repère (X,Y,Z) de la voiture et le repère (X,Y) du circuit);
- vitesse en km/h ;
- guide du véhicule (=1 si voie de droite et =2 si voie de gauche).

- Un fichier, nommé *temp*, indiquant la température à l'intérieur de l'habitacle, information nécessaire à l'exploitation des données physiologiques.

2.3.2 Questionnaires

Au début de l'expérimentation, le participant remplit un questionnaire signalétique ainsi qu'un questionnaire sur son style de conduite. À la fin de l'expérimentation, l'expérimentateur repasse la bande vidéo de la première situation du second scénario jusqu'à l'apparition du véhicule de derrière puis il arrête la bande et lui demande quelles étaient ses intentions à ce moment donné et quelles actions il comptait réaliser.

2.3.3 Le recueil vidéo

Durant les phases de conduite, les participants sont filmés (figure 24). Ces vidéos nous permettent d'expliquer au besoin les différentes « anomalies » qu'il est possible de rencontrer au moment de l'analyse des données mais aussi peuvent nous fournir des informations non « chiffrables » comme par exemple le fait que le conducteur se prépare à freiner en mettant son pied sur la pédale de frein sans l'enfoncer. Six caméras ont été utilisées afin de filmer :

- le visage du participant
- son buste
- ses mains
- ses pieds
- la scène avant du simulateur
- la scène arrière.

Le quatrième champ (en bas à droite) nous permet de synchroniser les vidéos avec les données issues du simulateur.

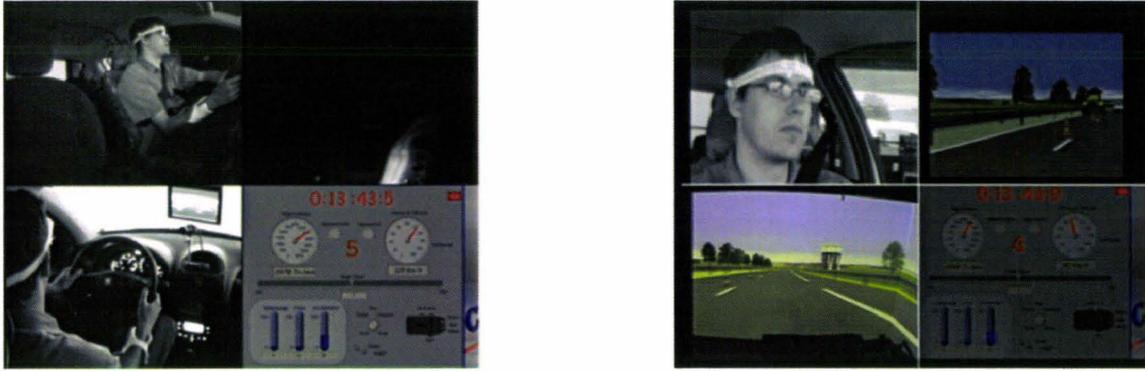


Figure 24 : Vidéos recueillies lors d'une expérimentation.

2.4 Le déroulement d'une passation (figure 25)

2.4.1 Accueil du participant

A son arrivée, le participant était invité à compléter deux questionnaires, le premier sur des questions générales (le nombre d'années de conduite, expérience dans les simulateurs, etc.), le second sur ses habitudes de conduite. Ensuite, l'expérimentation lui était expliquée brièvement au moyen d'une présentation « PowerPoint ».

2.4.2 Pose des équipements physiologiques

Tout d'abord, la tension artérielle du participant était relevée. Concernant l'activité électrodermale, deux électrodes et la sonde de température ont été posées sur une main pour obtenir un niveau de référence. Pour la fréquence cardiaque, deux électrodes ont été utilisées, la première posée à l'intérieur du poignet droit et la seconde à l'extérieur de la cheville gauche. Pour finir, deux ceintures respiratoires ont été placées, l'une au niveau du thorax, l'autre de l'abdomen, et ce, pour être sûr d'obtenir au moins un signal correct.

2.4.3 Phase de repos

Le participant a été installé dans le véhicule et les électrodes ont été câblées sur le Biopac (matériel pour l'acquisition des données physiologiques). Ensuite, le sujet a été laissé seul pendant 5 minutes afin d'obtenir un niveau de référence au repos. Nous lui avons demandé de rester le plus immobile possible.

2.4.4 Familiarisation

Les électrodes et la sonde de température ont été déplacées sur le front pour ne pas gêner le conducteur durant la conduite. Le participant pouvait alors commencer la phase de familiarisation. Le véhicule lui était présenté comme parfaitement normal. Cette phase durait une quinzaine de minutes, sur autoroute. Pendant la première moitié du circuit, le participant était seul sur la route puis pendant l'autre moitié, quelques véhicules du trafic intervenaient.

2.4.5 Passation des scénarii

Le participant a été invité à parcourir successivement trois circuits différents ; après chaque circuit, le participant devait s'arrêter, ce qui permettait le rechargement du circuit suivant. Pendant ce temps, un des expérimentateurs lui demandait si tout se passait bien pour ne pas qu'il prête trop d'attention au chargement du circuit.

2.4.6 Fin de l'expérimentation

Une fois le dernier circuit fini, le participant était libéré de ses électrodes et sa tension artérielle était à nouveau relevée. Avant de partir, il répondait à un dernier questionnaire d'auto-confrontation sur la première situation du second scénario (110km/h – 3 véhicules).

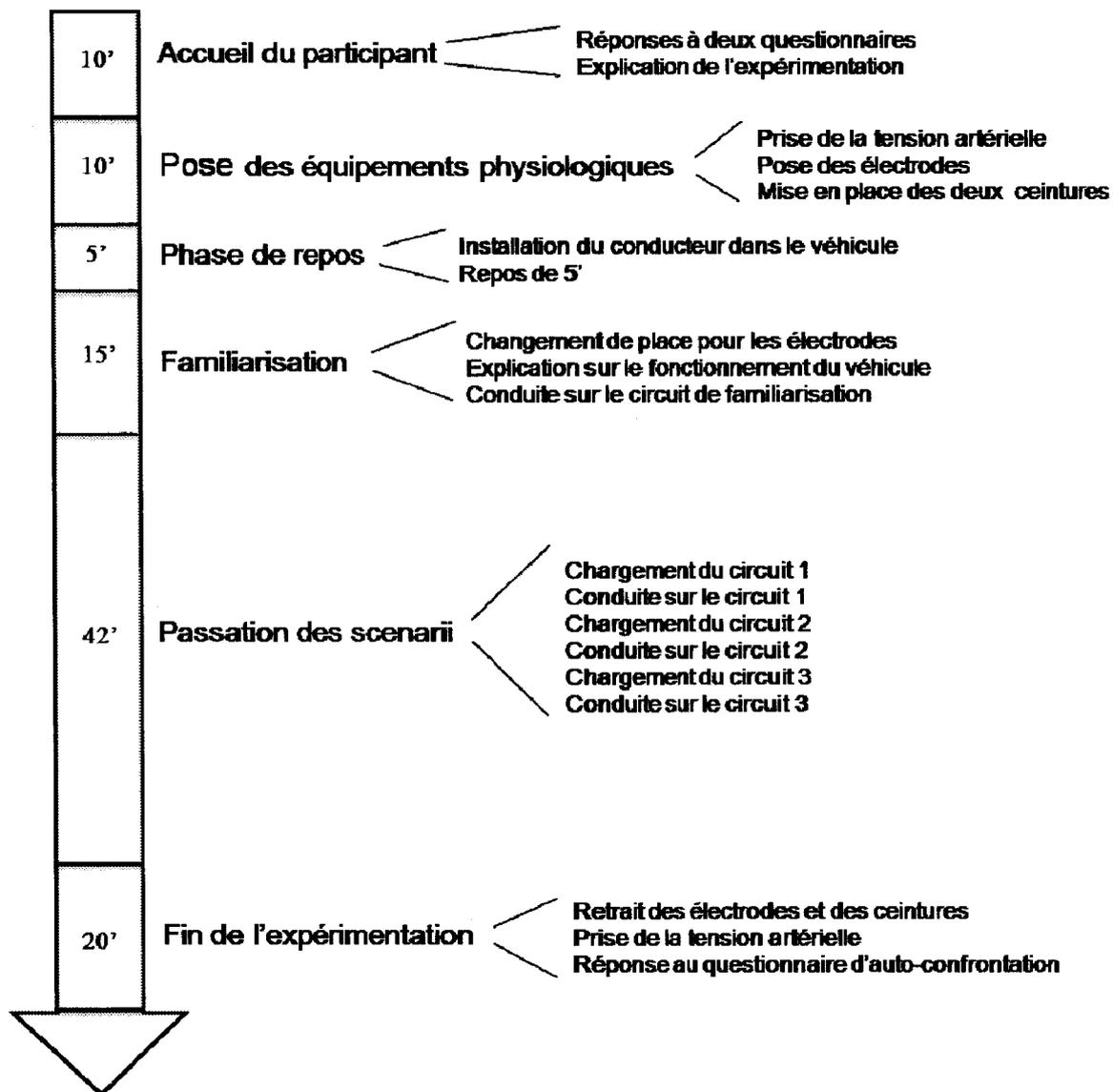


Figure 25 : Déroulement d'une passation.

2.5 Population

L'objectif est d'avoir une population la plus homogène possible pour pouvoir étudier tous les participants sans faire de classes comme par exemple une classe d'hommes et une classe de femmes. Conscient de l'énorme difficulté de garder 100% des sujets à la suite de la phase expérimentale (risque de nausée dans le simulateur, difficulté que, pour un sujet donné, tous les signaux soient exploitables, ...), 40 personnes devaient être recrutées pour en avoir au moins 30 d'exploitables. La population se compose d'élèves-ingénieurs et de doctorants de sexe masculin, recrutés au sein de notre université. Les conditions minimales requises pour

participer à l'expérimentation étaient d'avoir le permis depuis au moins deux ans et d'avoir entre 20 et 30 ans.

3 Présentation des données initialement enregistrées

A l'issue des expérimentations, $U=3$ facteurs peuvent être considérés :

- le facteur individu i ($i=1, \dots, 38$)
- le facteur j ($j=1, \dots, 3$) correspondant aux nombres de véhicules qui interagissent avec le véhicule du participant
- le facteur k ($k=1, \dots, 9$) correspondant aux modalités des différents véhicules du trafic (tableau 2).

Valeur de k	Vitesse de VT1	Distance entre VS etVT2
1	p	-
2	g	-
3	v	-
4	p	p
5	g	p
6	v	p
7	p	g
8	g	g
9	v	g

p = vitesse de 90 km/h ou interdistance de 0.5s
 g = vitesse de 110 km/h ou interdistance de 1.5s
 v = vitesse variable entre 90 km/h et 110 km/h

Tableau 2 : Valeurs de k.

Pour chaque triplet (i,j,k) existant, la base de données initiale HO contient (figure 26) :

- les données SHERPA composées de deux types de fichier : les fichiers VS et les fichiers VT. Ces données représentent 28 signaux temporels d'échelles continues ou discrètes.
- les données physiologiques comprenant 4 signaux temporels.
- les données « vidéo » constituées de deux bandes de 55 minutes chacune.
- les questionnaires.

Le nombre maximal de cellules de HO est $H=I*J*K=38*3*9=1026$.

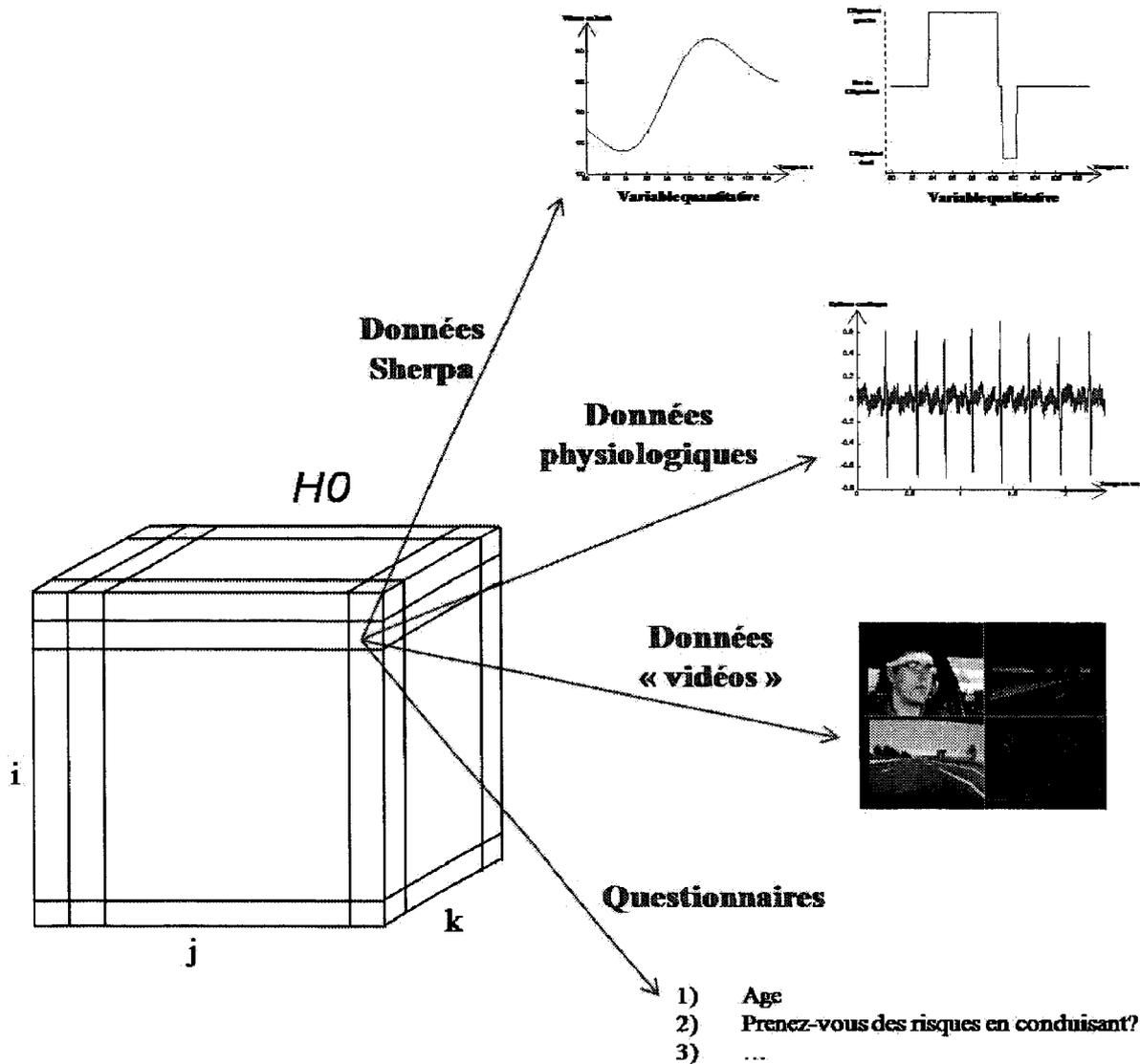


Figure 26 : Contenu d'une case de HO .

La base de données HO est prête pour la première étape du processus d'analyse, c'est-à-dire la caractérisation.

4 Caractérisation des données

4.1 Cellules de HO

Sur les $H=1026$ cellules de HO , certaines n'existent pas pour différentes raisons :

- Certaines combinaisons du triplet (i,j,k) ne peuvent pas être expérimentés, par exemple $j=1$ et $k=9$.

- Quatre sujets ($i=1$, $i=2$, $i=14$ et $i=27$) ont du être supprimés. Les deux premiers sujets de la campagne expérimentale nous ont permis de nous familiariser avec le protocole expérimental et de modifier quelques bugs que nous avons rencontrés. Le quatorzième sujet a été malade lors du premier circuit, ne supportant pas l'effet « bateau » du simulateur. Le vingt-septième sujet a roulé à 50km/h sur les différents circuits. Nous avons continué l'expérimentation jusqu'à la fin pour ne pas le frustrer.
- Trois sujets ($i=9$, $i=12$ et $i=19$) n'ont effectué que 14 dépassements sur les 15.

La base de données initiale $H0$ devient $H1$ avec $H1=507$ cellules.

4.2 Données supprimées

La base de données $H0$ contient quatre types de données : SHERPA, physiologiques, vidéos et issues des questionnaires. Toutes ces données ne pourront pas être prises en compte dans l'analyse.

En premier lieu, il convient d'aborder le problème du recueil des données physiologique qui s'est posé lors de la réalisation des expérimentations. Le chercheur ayant en charge le recueil de ces données a du subir une lourde intervention chirurgicale en urgence au tout début de la phase expérimentale. Compte tenu des délais et de l'impossibilité de repousser l'expérimentation, il ne nous a pas été possible de trouver quelqu'un de compétant en mesures physiologiques qui soit disponible pour toute la durée de l'expérimentation. Nous avons néanmoins positionné les électrodes sur les sujets tels que nous avions prévu de le faire. A l'issue de l'expérimentation, nous avons du nous rendre à l'évidence qu'en raison de notre manque d'expérience, le positionnement des électrodes s'est avéré incorrect pour la plupart des sujets, ne nous permettant de recueillir que des mesures extrêmement bruitées et donc inexploitable.

En second lieu, les questionnaires et le recueil vidéo ne seront pas pris en compte comme données de l'analyse dans un premier temps. Le dépouillement devant se faire manuellement, ces données ne serviront que pour expliquer un comportement inhabituel décelé lors de l'analyse des données objectives.

En ce qui concerne les données SHERPA, $V0=28$ variables si on considère la notation définie dans le chapitre 2. Certaines composantes ne sont pas utiles pour l'analyse. C'est le

cas par exemple pour les positions en X , Y et Z de la plate-forme ou de l'état de la boîte de vitesse puisque nous avons remarqué que pendant les situations de dépassement le conducteur roulait à 130km/h et que l'état de la boîte de vitesse était toujours à 5. Les plus intéressantes sont la vitesse en km/h, la position de la pédale d'accélérateur en %, la position de la pédale de frein en %, la valeur de l'angle au volant en degrés, l'état des clignotants et la position latérale en mètres. $VO_s=22$ variables seront donc supprimés de la base de données.

Les composantes VO de HO sont de deux types : continues ou discrètes; elles proviennent de capteurs et sont enregistrées à une fréquence de 40Hz. Il faut donc d'une part les filtrer afin d'éliminer le bruit et d'autre part les ré-échantillonner à une fréquence plus faible.

4.3 Filtrage et ré-échantillonnage

L'observation du spectre fréquentiel des données continues montre qu'elles sont bruitées (figure 27a). Pour pallier ce problème, les données ont été filtrées à l'aide du filtre de Butterworth de type passe-bas d'ordre 3, la fréquence de coupure (par exemple, $f_c=0.1$ Hz pour la position de la pédale d'accélérateur et $f_c=2$ Hz pour la valeur de l'angle au volant) a été déterminée grâce au spectre fréquentiel (figure 27b).

Les données brutes sont échantillonnées à 40Hz, après différents essais il a été décidé de les ré-échantillonner à 10Hz sans qu'il y ait une perte d'information (figure 27c).

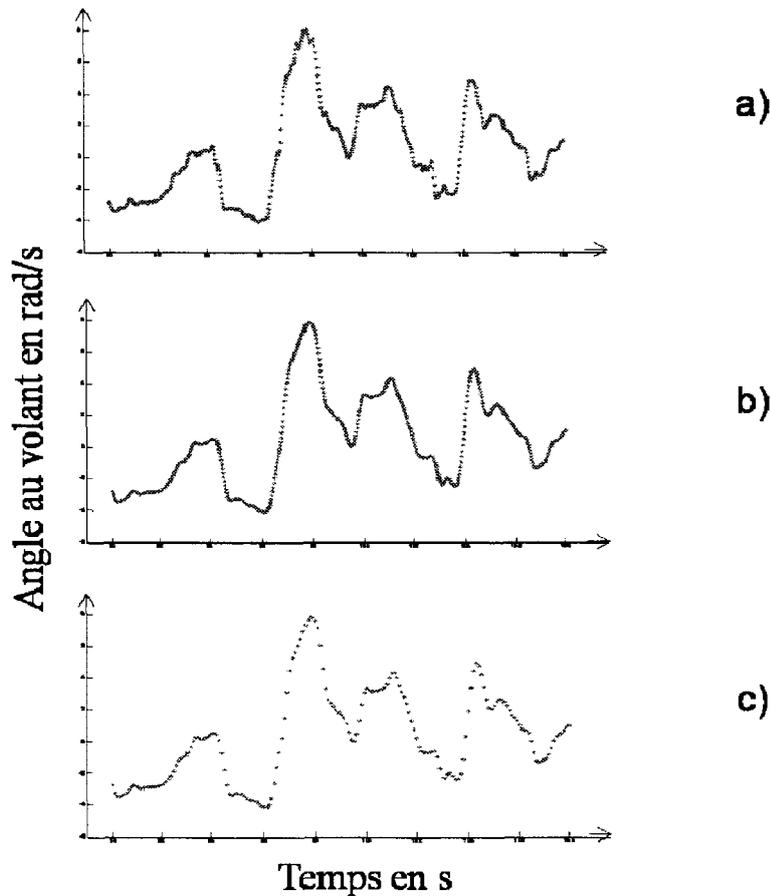


Figure 27 : a) Angle au volant. b) Angle au volant après filtrage. c) Angle au volant après rééchantillonnage.

4.4 Calcul de nouvelles variables

Dans la littérature, les variables de base sont souvent associées à leurs dérivées afin d'être analysées. La dérivée de la vitesse, de la position de la pédale d'accélération, de l'angle au volant et de la position latérale sont donc calculées. Le calcul de ces dérivées permet d'avoir des informations supplémentaires à propos du comportement du conducteur, par exemple, la dérivée de la position de la pédale d'accélérateur donne une indication dynamique sur le fait que le conducteur appuie ou relâche la pédale d'accélérateur.

De plus, pour étudier le comportement du conducteur, la prise en compte de l'environnement est indispensable. Pour cette expérimentation, il est intéressant de calculer des indicateurs basés sur les « interactions » avec le véhicule VT1. Ceux sont essentiellement des différentiels de vitesse et de distance puisque les indicateurs comme le TTC ([Kiefer *et al.*, 2005], [Vogel, 2003], [Minderhoud et Bovy, 2001]), le TIV ([Rakauskas *et al.*, 2004],

[Vollrath et Totzke, 2000)]... se calculent à partir de ces informations et que l'ACM ne permet pas d'avoir des variables dépendantes.

A partir de l'ensemble initial de variables $V0$, $V0n=6$ variables sont donc créés : les 4 dérivées des variables de base et les différentiels de distance et de vitesse avec VT1.

La table de données initiale $H0$ est transformée en $H1$ (figure 28) avec le nombre de cellules $H1=507$ et le nombre de variables dans $H1$, $V1 = V0 - V0s + V0n = 28 - 22 + 6 = 12$.

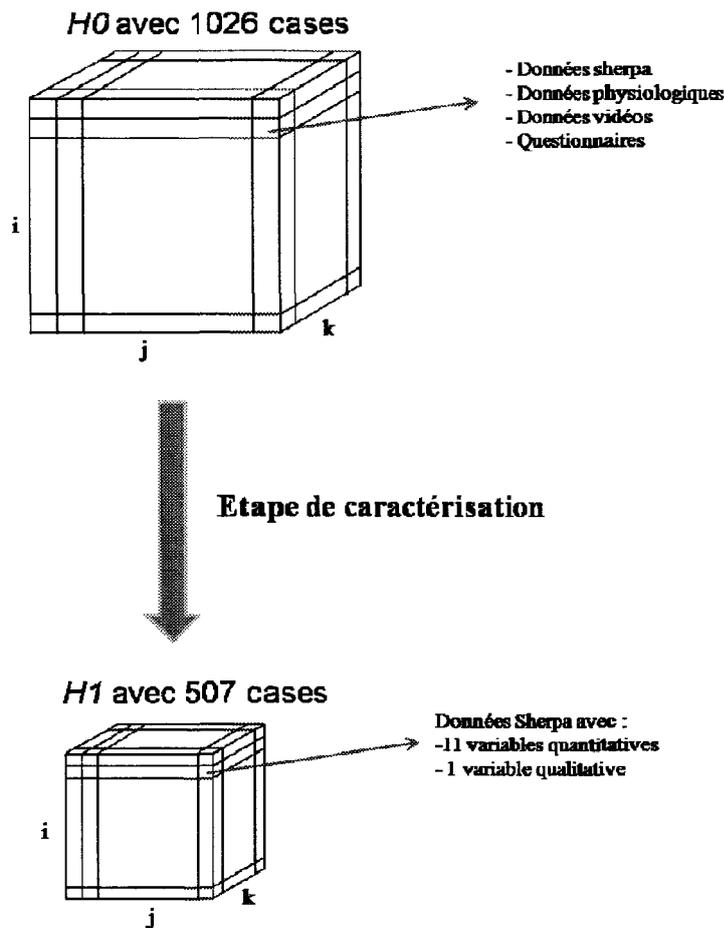


Figure 28 : Passage de $H0$ à $H1$.

5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'expérimentation que nous avons réalisée et au début de la caractérisation des données.

Tout d'abord, nous avons présenté le simulateur de conduite SHERPA, le parcours expérimental qu'il nous a été possible de créer et les données qui ont pu être recueillies.

Ensuite, nous avons abordé la construction des situations expérimentales. 15 situations ont été créées pour mettre le conducteur dans différentes situations de dépassement et donc avoir une analyse du conducteur assez complète.

Le déroulement d'une passation a été expliqué en détail. Cette passation a pu être testée par une quarantaine de participants.

Pour terminer ce chapitre, nous avons commencé les premières phases de l'étape de caractérisation des données. La base de données initiale a subi plusieurs transformations : réduction du nombre de cellules, données autre que Sherpa supprimées, données Sherpa filtrées et rééchantillonnées et création de nouveaux indicateurs pour les besoins de l'analyse. Ce qui a donné la base de données *III*. Cette base va encore subir quelques transformations pour que l'étape de caractérisation soit terminée, à savoir le découpage spatio-temporel, ce qui fera l'objet de la première partie du chapitre suivant. Ce chapitre comprendra également toutes les étapes allant du codage à la présentation des résultats (figure 14 du chapitre II).

IV Analyse de données

1 Introduction

Ce chapitre va débiter par la caractérisation de la base de données multifactorielle multivariée (MFMV) $H1$, notamment le découpage spatio-temporel (la première phase de cette étape de caractérisation - filtrage/ré-échantillonnage...- ayant été faite dans le chapitre précédent). Rappelons que cette étape est la première d'une série de cinq, les suivantes étant le codage de données, la mise sous formes de tableaux de données, l'étude de ces tableaux et, enfin, la présentation des résultats sous des formes classiques, notamment des graphiques bi ou tri-variés (cf. chapitre II).

Les chapitres I et II ont montré que, souvent, l'exploitation d'une base MFMV est abordée par une approche monovariée inférentielle. Pour notre part, la volonté, pour une première analyse tout au moins est de ne pas faire appel à de telles approches. L'objectif est de conserver l'aspect multifactoriel (dont les facteurs *temps* et *individu*) et l'aspect multivariable le plus longtemps possible dans l'analyse. Ainsi, une description complète des tenants et aboutissants des 5 étapes de l'analyse est trop longue pour tenir dans un seul chapitre. C'est pourquoi, ce présent chapitre va plutôt se focaliser sur les aspects méthodologiques.

2 Etape 1 : Caractérisation spatio-temporelle

Dans la fin du chapitre précédent, nous avons vu que la base de données initiale $H0$ a été transformée en $H1$. Après ces premières phases de transformation, la base de données $H1$ sera transformée en $H2$ à l'aide d'un découpage spatio-temporel, cette phase terminera l'étape de caractérisation. Nous devons porter une attention particulière quant au choix du découpage spatial et temporel puisque cette étape est la première dans le processus d'analyse de données, elle conditionnera donc les résultats de l'analyse.

2.1 Découpage temporel

Dans la littérature, la manœuvre de dépassement est segmentée différemment d'un auteur à l'autre, ce qui montre la difficulté de construire un fenêtrage temporel. Pour notre part, les choix inhérents au découpage s'appuient sur la bibliographique (notamment en

psychologie et ergonomie) et sur une analyse concertée avec une psychologue du LAMIH qui nous a aidés à déterminer les fenêtres qui avaient le plus de signification dans la manœuvre de dépassement. La méthodologie utilisée pour la construction de la segmentation temporelle va alors être la suivante :

- 1) les fenêtres temporelles vont être définies sous formes de nuances verbales (mises en italiques),
- 2) les durées et frontières seront ensuite définies de manière plus spécifique,
- 3) pour chaque signal multidimensionnel, les valeurs situées le long de l'axe du temps seront affectées automatiquement (éventuellement avec l'aide de reprises manuelles) aux fenêtres temporelles.

Dans notre cas, pour la première phase, et à l'instar de ce qui est fait en automatique « industrielle », deux fenêtres temporelles (FT) vont correspondre aux états initiaux et finaux du système conducteur-véhicule-environnement, respectivement *avant d'entreprendre le dépassement* (c'est-à-dire une FT pendant laquelle le conducteur prend la décision de dépasser le véhicule de devant) et *après avoir effectué le dépassement*. Ceci étant, une première fenêtre intermédiaire est à considérer, celle correspondant à *l'arrivée du conducteur sur la voie de gauche et au dépassement du véhicule du trafic*. Désignons cette fenêtre par t_0 . En remontant dans le temps, vient la fenêtre temporelle t_0-1 qui *commence quand le conducteur tourne le volant pour se déplacer de la voie de droite vers la voie de gauche*. Avant la fenêtre temporelle t_0-1 , vient la fenêtre temporelle t_0-2 durant laquelle *le conducteur s'apprête à commencer la manœuvre*. Toujours en remontant le temps, vient la fenêtre correspondant aux conditions initiales évoquées plus haut ; désignons cette fenêtre par t_0-3 .

En repartant de la fenêtre temporelle t_0 (*arrivée du conducteur sur la voie de gauche et dépassement du véhicule du trafic*) et en avançant maintenant dans le temps, vient la fenêtre t_0+1 , qui *commence quand le conducteur quitte la voie de gauche pour retourner sur la voie de droite*. Ensuite vient la fenêtre t_0+2 , qui correspond aux conditions finales (*le conducteur est sur sa voie de départ et continue de conduire sans rencontrer d'obstacles*).

Cette première phase de définition des nuances verbales susceptibles d'être associées aux FT étant faite, vient une seconde phase de spécification des frontières. Dans la littérature à caractère psychologique ou ergonomique, la segmentation temporelle se fait de manière

essentiellement booléenne : la valeur d'appartenance d'un échantillon temporel l à une fenêtre temporelle t (que l'on peut noter sommairement par $\mu_t(l)$) vaut 0 ou 1. Avec une telle limitation, se pose la difficulté de déterminer la frontière entre deux fenêtres puisque d'une part le conducteur ne précise pas à chaque instant ses actions et d'autre part, un algorithme ne peut pas déterminer précisément si le conducteur est en train de changer de voie ou s'il oscille juste sur sa voie. Pour cela, on peut s'inspirer de ce qu'on rencontre dans la littérature en automatique, statistique ou traitement du signal (cf. chapitre II): le choix de fenêtres glissantes avec des poids pouvant prendre des valeurs autres que 0 ou 1. Cette nouvelle perspective ayant été discutée avec notre collègue psychologue, il a été décidé de construire des fonctions d'appartenance trapézoïdales (ou triangulaire si la durée est courte). En outre, dans le but de simplifier le choix du paramétrage du découpage, 1) les deux pentes de la fonction d'appartenance correspondant au début et à la fin de chaque FT ont été choisies de manière à être identiques et 2) les cinq largeurs dite d'« hésitation », entre les paires de fenêtres successives ont également été choisies identiques, ce qui abouti au schéma de découpage générique présenté figure 29.

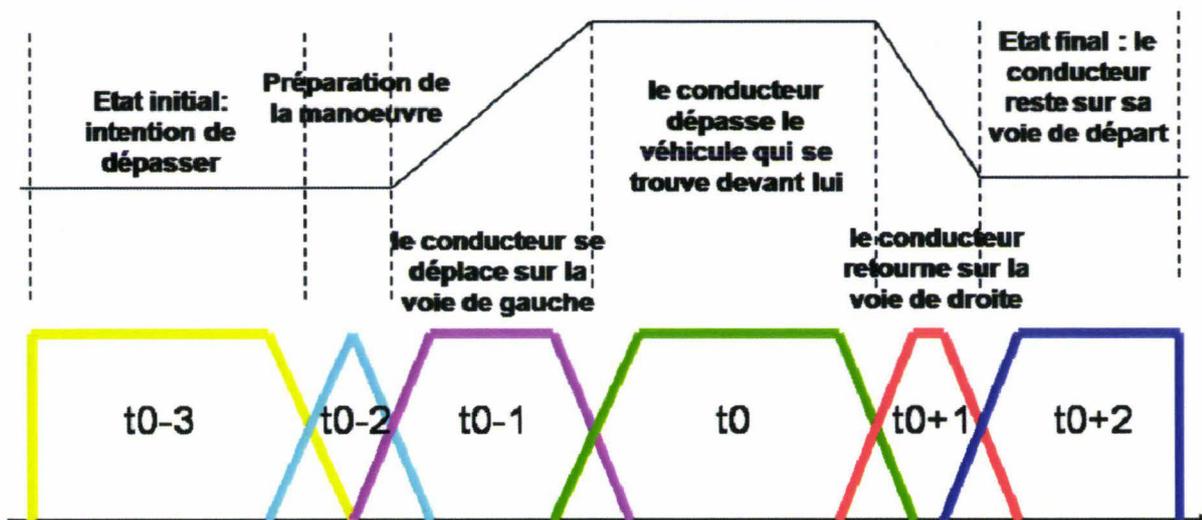


Figure 29 : Découpage temporel selon 6 fenêtres trapézoïdales ou triangulaires.

Ces choix simplificateurs étant faits, se pose ensuite le problème du choix, pour chaque fonction d'appartenance, des valeurs génériques le long de l'axe temporel, celles-ci pouvant correspondre, soit aux instants où il y a un changement de pente de la fonction, soit aux instants où la fonction vaut 0,5. Dans la suite, ces valeurs génériques seront appelées « pivots » [Benzecri, 1992]. Ces derniers sont issus de l'observation méticuleuse des signaux

multidimensionnels et essentiellement de la composante correspondant à la variable *position latérale* (Figure 30).

La démarche est la suivante :

- tout d'abord, les points correspondant au franchissement de la ligne centrale sont recherchés. Pour chaque dépassement, il y a donc deux points : *pivot m1* et *pivot m2*.
- à partir du point *pivot m1*, il est possible d'identifier les points *pivot 1* (début de déboîtement) et *pivot 2* (arrivée sur la voie de dépassement). En effet, le point *pivot 1* correspond soit au premier maximum rencontré en partant vers la gauche soit au milieu de la voie de droite, le point *pivot 2* correspond soit au premier minimum rencontré en partant vers la droite soit au milieu de la voie de gauche. Il en est de même pour l'identification des points *pivot 3* et *pivot 4* à l'aide de *pivot m2*.
- ensuite, le découpage est basé à la fois sur des critères spatiaux et temporels. En effet, les fenêtres $t0-1$, $t0$ et $t0+1$ dépendent de critères spatiaux, identifiés à l'aide des pivots 2 et 3 puisque la durée est plus ou moins importante suivant la vitesse à laquelle roule chaque conducteur. Par contre, les fenêtres $t0-3$, $t0-2$ et $t0+2$ dépendent de critères temporels. En s'inspirant de la littérature, la durée est fixée à 4 secondes pour $t0-3$, 1 seconde pour $t0-2$ et 5 secondes pour $t0+2$.
- enfin, il faut choisir la durée d'« hésitation » entre deux frontières. Cette valeur a été déterminée en comparant les instants pivots détectés par deux expérimentateurs qui ont dépouillé les données de façon manuelle. Cette étude expérimentale a abouti à retenir une durée de 0.5 secondes.

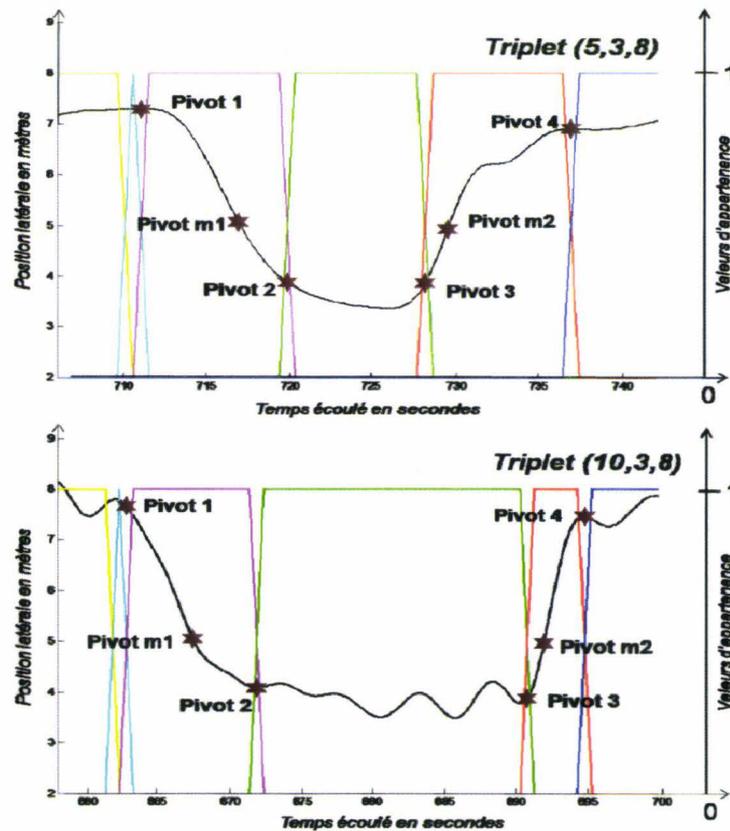


Figure 30 : Deux exemples de positionnement des instants pivots : en haut, cas sans oscillation de la trajectoire ; en bas, cas avec oscillation (un triplet (i,j,k) désigne le conducteur i , le nombre de véhicules j et la modalité des véhicules du trafic k).

Ces choix des instants pivots étant faits, la troisième phase évoquée plus haut a pu être appliquée.

En résumé, à l'issue de ce découpage, chaque triplet (i,j,k) (pour rappel : i = facteur individu ($i=1,\dots,34$), j = nombres de véhicules qui interagissent avec le véhicule du participant ($j=1,\dots,3$) et k = modalités des différents véhicules du trafic ($k=1,\dots,9$)) est associé à un tableau *TMV* (*Time Membership Values*) appelé T_{ijk} , dont chaque ligne r correspond à chaque échantillon temporel l (à 10 Hz) et chaque colonne c correspond à chaque fenêtre temporelle t , la valeur générique étant la valeur d'appartenance de l'instant associé à l'échantillon temporel l ($l=1, \dots, Ll_{ijk}$) à la fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T=6$). Passons au découpage spatial.

2.2 *Découpage spatial*

Si les modèles des fenêtres spatiales (FS) peuvent présenter la même forme que ceux de modèles des FT (trapèzes ou triangles), la façon de les construire est tout-à-fait différente [Loslever *et al*, 2008]. La méthodologie utilisée pour la construction de la segmentation spatiale peut également s'appuyer sur 3 phases:

- 1) les fenêtres spatiales vont être définies sous formes de nuances verbales (mises en italiques),
- 2) les durées et frontières seront ensuite définies de manière plus spécifique,
- 3) pour chaque composante de chaque signal multidimensionnel, les valeurs physiques (angle, vitesse, ...) présentes à chaque instant sont affectées automatiquement aux fenêtres spatiales.

Pour la première phase, il faut garder à l'esprit que le nombre de FS est un compromis entre un nombre réduit qui provoque une perte d'information mais qui simplifie l'analyse (surtout si le nombre de variables est important) et un nombre élevé qui donne une description certes plus détaillée mais qui risque de générer des FS peu présentes (d'où un problème de robustesse des résultats). Au vu du nombre de variables, dans notre cas $V1 = 12$, l'utilisation d'un nombre réduit de fenêtres spatiales semble suffisant pour ne pas compliquer, pour une première analyse tout au moins, l'exploitation d'une grande base MFMV. Prendre 3 FS – *petit, moyen, grand* – peut s'avérer intéressant dans la mesure où ce choix permet déjà de faire apparaître des relations non-linéaires entre des variables quantitatives (par exemple comme l'association entre *petites valeurs* de la variable x , *grandes valeurs* de la variable y et *moyennes valeurs* de la variable z) ainsi que des relations entre ces variables et une variable qualitative (comme le clignotant). Ensuite, le découpage doit s'appuyer sur la forme de l'histogramme d'amplitude de la variable temporelle. Par exemple, avec un histogramme unimodal symétrique de type Laplace-Gauss, les 3 FS citées ci-dessus peuvent correspondre à la zone modale et aux flancs gauche et droit de l'histogramme. Ceci étant, si une valeur de référence existe a priori sur l'échelle physique (comme le zéro de l'angle au volant ou la valeur nulle de l'accélération longitudinale), il peut être préférable d'adapter la FS intermédiaire à cette valeur physique plutôt qu'à un indicateur statistique comme le mode ou la moyenne arithmétique. En présence d'un histogramme composé de deux modes comme la position latérale du véhicule, le nombre de FS dépasse 3 et le découpage peut être adapté aux

modes et/ou aux valeurs de références, ce qui peut donner 5 FS, cf. figure 16 du chapitre II. Bien entendu, dans le cas de variables qualitatives comme le clignotant, le découpage se fait en tenant des modalités intrinsèques : *clignotant gauche*, *pas de clignotant* et *clignotant droit*.

Cette première phase de définition des nuances verbales susceptibles d'être associées aux FS étant faite, vient une seconde phase de spécification des frontières. Là aussi une analyse méticuleuse des histogrammes d'amplitude s'impose. Elle nous a notamment permis de constater que les valeurs situées le plus à gauche et/ou le plus à droite étaient parfois « anormalement » trop petites ou trop grandes. Donc pour ne pas perturber la segmentation spatiale, il apparaît opportun d'éliminer certaines valeurs trop excentrées par rapport au(x) mode(s) ou à certaine(s) valeur(s) de références de l'analyse. Une valeur de 1% des extrema nous a semblé un bon compromis entre enlever des valeurs « bonnes » mais positionnées très à gauche ou à droite et des valeurs « douteuses » en raisons des bruits, voire un dysfonctionnement passager du capteur. En définitive, de l'analyse des histogrammes des variables quantitatives, il ressort que le nombre de FS peut être fixé à 3 sauf, pour le cas évoqué plus haut de la position latérale. La figure 31 donne 3 exemples de découpage et le tableau 3 donne les libellés des FS des variables temporelles.

Ces choix des pivots des FS étant faits, la troisième phase évoquée plus haut a pu être appliquée.

En résumé, à chaque triplet (i,j,k) est associé un tableau *SMV* (*Space Membership Values*) appelé S_{ijk} , dont chaque ligne r correspond à chaque échantillon temporel l et chaque colonne c correspond à la fenêtre spatiale s ($s=1, \dots, S_v$) pour chaque variable v ($v=1, \dots, VI=12$). Le nombre de colonnes est égal à 10 variables * 3 modalités + 1 (position latérale) * 5 + 1 (frein) * 2 = 37.

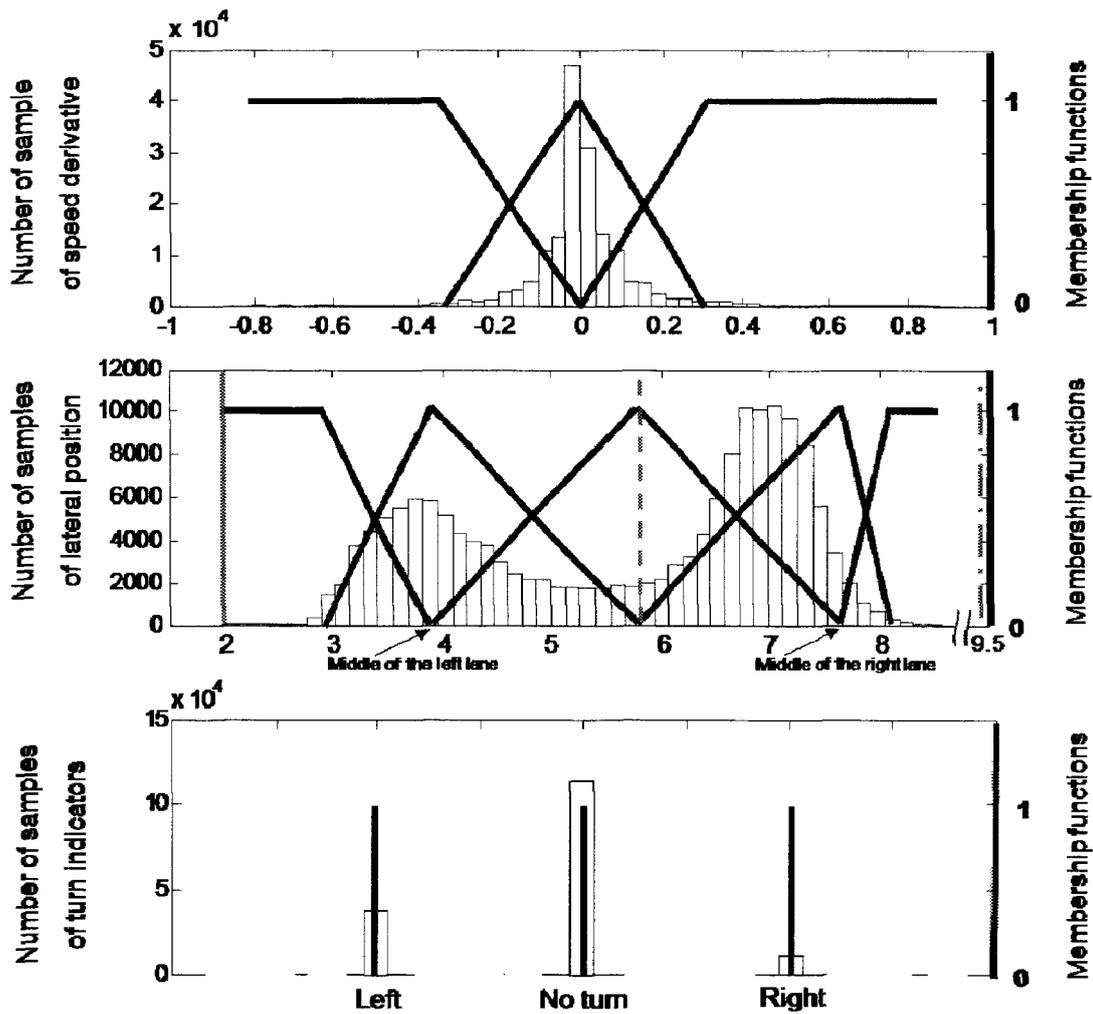


Figure 31 : Exemples de découpage spatial. a) Dérivée de la vitesse, b) Position latérale et c) Clignotant.

<i>Nom des variables</i>	<i>Label</i>	<i>Label des modalités spatiales</i>
Speed ($m.s^{-1}$)	<i>SP</i>	<i>SPl SPm SPh</i>
Throttle pedal (%)	<i>TP</i>	<i>TPl TPm TPh</i>
Brake pedal (%)	<i>BP</i>	<i>BP0 BP1</i>
Steering angle ($^{\circ}$)	<i>SA</i>	<i>SA< SA^ SA></i>
State of indicators	<i>IN</i>	<i>IN< IN^ IN></i>
Lateral position (m)	<i>LP</i>	<i>LPL LPl LPm LPr LPR</i>
Acceleration (speed derivative) ($m.s^{-2}$)	<i>Sp</i>	<i>sp- sp= sp+</i>
Throttle pedal derivative ($\%.s^{-1}$)	<i>Tp</i>	<i>tp- tp= tp+</i>
Steering angle derivative ($\%.s^{-2}$)	<i>Sa</i>	<i>sa< sa^ sa></i>
Lateral position derivative ($m.s^{-1}$)	<i>Lp</i>	<i>lp< lp^ lp></i>
Distance with the vehicle ahead (m)	<i>DV</i>	<i>DVl DVm DVh</i>
Speed difference with the vehicle ahead	<i>SV</i>	<i>SVl SVm SVh</i>

(m.s ⁻¹)		
----------------------	--	--

Tableau 3 : Description des VI variables et de leur modalité spatiale.

L'intitulé des variables est en anglais afin d'éviter de les traduire et surtout, de reprendre les figures montrant le découpage et les plans factoriels, lors de la rédaction d'articles en anglais.

2.3 Combinaison des segmentations temporelle et spatiale

A chaque case (i,j,k) du parallélépipède $H1$ est associé un tableau $STMV$ (*Space-Time Membership Values*) dont chaque ligne r correspond à chaque fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T$). Ce tableau contient :

- une colonne d'identificateurs de chaque ligne (notamment dans la perspective de repérer chaque quadruplet (i,j,k,t) sur les plans factoriels),
- le tableau de facteurs X_{ijk} dont chaque colonne c correspond aux facteurs i (individu), j (nombre de véhicule du trafic), k (modalité pour les véhicules VT1 et VT2) et t (fenêtre temporelle). Pour plus de détails, se reporter à la partie 3 du chapitre III,
- le tableau de valeurs physiques $Y2_{ijk}$ dont chaque colonne c correspond aux valeurs physiques moyennées de chaque variable v ($v=1, \dots, VI$, hormis pour la variable qualitative où calculer une moyenne a peu de sens) pour chaque fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T$), cf. II pour le principe de calcul de la moyenne pondérée,
- le tableau de valeurs d'appartenance ST_{ijk} dont chaque colonne c correspond aux valeurs d'appartenance de chaque fenêtre spatiale s ($s=1, \dots, S_v$) moyennées par fenêtres temporelles pour chaque variable v ($v=1, \dots, VI$).

En résumé, cette étape de caractérisation a permis d'affecter des modalités spatio-temporelles à chaque composante des triplets (i,j,k) . La base de données parallélépipédique $H1$ est transformée en $H2$ avec $H1 = H2$ cases.

3 Etape 2 : Codage des données

Comme le tableau de valeurs d'appartenance ST_{ijk} contient des valeurs comprises entre 0 et 1, les données sont homogènes, l'étape de codage n'est donc pas nécessaire. Bien entendu, si suite à l'analyse des tableaux ST_{ijk} , les données des tableaux $Y2_{ijk}$ sont analysées

(par exemple, un test d'hypothèse statistique), des codages spécifiques peuvent être mis en œuvre (comme le codage fournissant des rangs dans les tests non-paramétriques).

4 Etape 3 : Mise en forme des données

Chaque triplet (i,j,k) de $H2$ contient les tableaux à deux entrées X_{ijk} , $Y2_{ijk}$ et ST_{ijk} . Pour appliquer une méthode statistique, chaque triplet de $H2$ peut être regroupé dans un seul grand tableau à deux entrées (figure 19 du chapitre II). Ce tableau sera composé de $H2 \times T = 507 \times 6 = 3042$ lignes et ses colonnes correspondront aux colonnes des tableaux X_{ijk} , $Y2_{ijk}$ et ST_{ijk} .

A partir de ce tableau, il est possible d'en générer d'autres, par exemple en moyennant sur certaines lignes (cf. partie 5.2 du chapitre II) : ST_i et ST_{J*K*T} . Mettre en place de tels tableaux nous permettra de mieux mettre en évidence l'influence des facteurs i, j, k et t .

5 Etape 4 : Analyse des tableaux

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II, nous commencerons l'analyse de données par des méthodes descriptives, ceci en raison de la taille de la base de données et pour ne pas faire d'hypothèses a priori. Comme la base de données contient des valeurs d'appartenance, l'Analyse des correspondances Multiples (ACM) a été choisie (une méthode de la case 2 de la figure 15 du chapitre II).

Cette analyse se fera sur le tableau ST_{ijk} contenant 3042 lignes et 37 colonnes. Dans le but de faire apparaître l'influence des facteurs i, j, k et t , l'analyse s'intéressera aux divers tableaux mentionnés ci-dessus (cf. IV.4) en projetant leurs lignes respectives en points illustratifs.

Une première ACM nous a permis de détecter une corrélation forte entre la variable vitesse (SP , cf. tableau 3) et la variable différence de vitesse (SV) entre le véhicule sujet (noté VS) et le Véhicule du Trafic n°1 placé devant (noté VT1). De ce fait, la variable SP a été supprimée car elle offre moins d'information en ce qui concerne les éléments de l'environnement. Une deuxième analyse se fera donc sur un nouveau tableau, désigné par ST^*_{ijk} , et contenant donc 34 colonnes.

Les deux premiers axes révèlent des inerties relatives, 17% et 13%, sensiblement plus élevées que les suivantes, par rapport à 11% (axe 3), 9%, 8%, 7%, 7%, 5%, 5% et 4% (axe 10). De ce fait, l'analyse se focalisera essentiellement sur le plan croisant les axes 1 et 2 (30% d'inertie). Rappelons qu'avec l'ACM, ces taux sont faibles, notamment par rapport à ceux de l'ACP. [Lebart *et al*, 2000] explique que cette propriété propre à l'ACM est due au codage disjonctif qui induit une orthogonalité artificielle des colonnes du tableau. Les plans croisant les axes qui suivent les axes 1 et 2 seront alors étudiés de manière plus sommaire et, pour des raisons de place limitée, uniquement les résultats les plus intéressants seront présentés ici, le reste étant reporté en annexe.

5.1 Etude des axes 1 et 2

5.1.1 Points en actifs

Commençons par analyser le graphe des points-modalités. Etant ici dans un contexte plutôt méthodologique, rappelons que l'ACM donne deux types de sorties : des sorties graphiques avec les plans factoriels et un tableau contenant, entre autres, les contributions des points-modalités aux axes. Il serait intéressant de tenter de représenter ces deux types de sorties (coordonnées et contributions) sur le même graphique. Pour cela, au lieu de représenter, de manière classique, le point-modalité par un « point », nous avons décidé de le représenter en s'inspirant des « attributs graphiques » de [Bertin, 1977]. Ici, nous utiliserons un losange dont la longueur des cotés est proportionnelle aux contributions (Figure 32a).

Le côté gauche de l'axe 1 met essentiellement en correspondance quatre modalités : la modalité *gauche* de la position latérale LPl , la modalité *gauche* du clignotant $IN<$, la modalité *gauche* de la dérivée de la position latérale $lp<$ et la modalité *positive* de la dérivée de la vitesse $sp+$. Le côté droit de l'axe 1, quant à lui, met en correspondance deux modalités : la modalité *pas de clignotant* $IN^$ et la modalité *droite* de la position latérale LPr . Des 4+2 positions respectives de ces points le long de l'axe horizontal une remarque s'impose : les 4 points de gauche se situant loin du centre de gravité, par rapport aux 2 points de droite, la conjugaison des 4 modalités correspondantes correspond à un comportement plutôt rare (en vertu du principe de l'effet barycentrique [Benzecri, 1984] (rappelons que le centre de gravité du nuage de points est l'intersection des axes).

La partie supérieure de l'axe 2 met essentiellement en correspondance la modalité *positive* de la dérivée de la vitesse $sp+$ et la modalité *extrême droite* de la position latérale sur

la chaussée LPr , puis viennent les modalités *gauche* du clignotant $IN<$ et *gauche* de la dérivée de la position latérale $lp<$. La partie inférieure met en correspondance la modalité *droite* du clignotant $IN>$, la modalité *droite* de la dérivée de la position latérale $lp>$ et les deux modalités *gauche* et *extrême gauche* de la position latérale LPl et LPL .

Passons à l'analyse des points-lignes (Figure 32b). Il apparaît assez clairement 6 nuages plus ou moins denses, chacun des nuages correspondant à une fenêtre temporelle t ($t=1, \dots, T=6$) et contenant $3042/6 = 507$ points. Sur la droite de l'axe 1 se situent les fenêtres temporelles 1 et 6 correspondant aux instants précédent (FT1) et suivant (FT6) le déboitement (voir Figure 29 pour la signification des fenêtres temporelles). Au milieu de l'axe 1 se trouvent les fenêtres 2 et 5 correspondant à l'instant juste avant le déboitement (FT2) et commençant à l'instant où l'individu se rabat (FT5). La gauche de l'axe 1 est représentée par les fenêtres 3 et 4, correspondant au déboitement (FT3) et au dépassement du véhicule (FT4). La lecture de l'axe 1 peut se faire selon un ordre chronologique figuré par un trait gris sur les 2 dessins de la figure 32 : on débute la manœuvre à droite de l'axe (instant initial), ensuite on se dirige vers la gauche de l'axe pour effectuer le dépassement puis on revient sur la droite quand la manœuvre est terminée (instant final).

Selon l'axe 2, une tendance se dégage : les fenêtres 1, 2 et 3 se situent plus vers le haut de l'axe que les fenêtres 4, 5 et 6.

Outre les positions relatives des points-lignes, le graphique nous donne une autre information intéressante : la densité du nuage de points n'est pas la même pour toutes les fenêtres temporelles. En effet, le nuage pour les fenêtres 1 et 6 est très dense, ce qui signifie que les dispersions intra et inter-individuelles sont faibles pour des fenêtres temporelles correspondant aux conditions initiales et finales. Pour les fenêtres 2 et 5, le nuage est un peu moins dense et pour les fenêtres 3 et 4, le nuage de points semble encore moins dense que les précédents. Ceci met donc en exergue les fortes variabilités intra et inter-individuelles au cours des dépassements.

En outre, à l'intérieur de la fenêtre 4, deux sous-nuages de points semblent apparaître. Appelons les C4L et C4I, L désignant le nuage le plus à gauche (L pour « Very Left ») et I le nuage le moins à gauche.

De la mise en relation du graphe des points-colonnes (points correspondant aux fenêtres spatiales) et de celui des points-lignes (points correspondant aux quadruplets (i,j,k,t)), il est possible d'identifier deux ensembles de résultats:

Résultat 1 : La mise en correspondance des deux graphiques de la figure 32 permet d'aboutir à une trajectoire « standard » (en gris) décrivant le comportement « multivariable » (au sens des fenêtres spatiales qui ont positionné les axes 1 et 2) de dépassement pour l'ensemble des sujets et l'ensemble des situations. Gardant à l'esprit que la trajectoire en gris n'exprime qu'une tendance, notons que ce comportement débute dans le quadrant supérieur droit (FT1) : le véhicule est sur la partie droite de la chaussée (présence de LPR et LPr), le clignotant est désactivé (IN^{\wedge}) et l'accélération du véhicule sujet est nulle ($sp=$). Elle évolue ensuite vers le quadrant supérieur gauche (FT2 et FT3) suite à une accélération importante ($sp+$), un déplacement vers la gauche ($lp<$) et surtout la mise en marche du clignotant gauche ($IN<$). Elle passe ensuite par le quadrant inférieur gauche (FT4) : le véhicule arrive dans la voie de gauche (LPL et LPl), l'accélération du véhicule est nulle ($sp=$) ou diminue ($sp-$) et aucun clignotant n'est allumé ($IN=$). La trajectoire se poursuit dans le quadrant inférieur droit (FT5) avec l'activation du clignotant droit ($IN>$) et le déplacement vers la partie droite de la chaussée ($lp>$). Elle se termine par un retour en « situation initiale » (FT6) dans la voie de droite (LPr), clignotant désactivé ($IN>$) et accélération du véhicule nulle ($sp=$).

En outre, pendant les fenêtres 2, 3 et 4, de larges dispersions inter et intra-individuelles peuvent être observées, en effet le nuage de points est beaucoup moins dense que lors des fenêtres 1, 5 et 6. Ces dispersions sont certainement dues à la stratégie de gestion de 1) l'accélération plus ou moins importante pour la réalisation du dépassement ($sp+$), 2) du changement de voie plus ou moins brusque ($lp<$) et 3) l'utilisation du clignotant (utilisation uniquement en début de manœuvre de changement de voie ou maintien pendant toute la durée de la manœuvre) ($IN<$). Ces différences de stratégies de dépassement peuvent être fonction des conducteurs et/ou des situations.

Résultat 2 : Comme la gauche de l'axe 1 est essentiellement positionnée par la modalité *gauche* du clignotant $IN<$, le nuage $C4L$ contient des quadruplets (i,j,k,t) où le clignotant gauche est utilisé plus souvent que pour le nuage $C4l$. De plus, ces deux sous-nuages de la fenêtre 4 sont plutôt positionnés vers le bas à gauche, ce qui signifie que la modalité *extrême*

gauche de la position latérale *LPL* est beaucoup plus présente lors de cette fenêtre. *C4L* semble caractériser les couples (conducteur, situation) qui conservent le clignotant gauche allumé pendant toute la phase de dépassement alors que *C4l* concernerait plutôt ceux où le clignotant ne fonctionne que pendant la phase de changement de voie et est éteint ensuite pendant le dépassement.

Notons que certaines parties de ces 2 ensembles de résultats seront illustrées de manière plus quantitative lors de la cinquième phase de l'analyse (plutôt que de considérer toutes les variables de l'ACM, seules 2 ou 3 variables seront conservées dans les dessins).

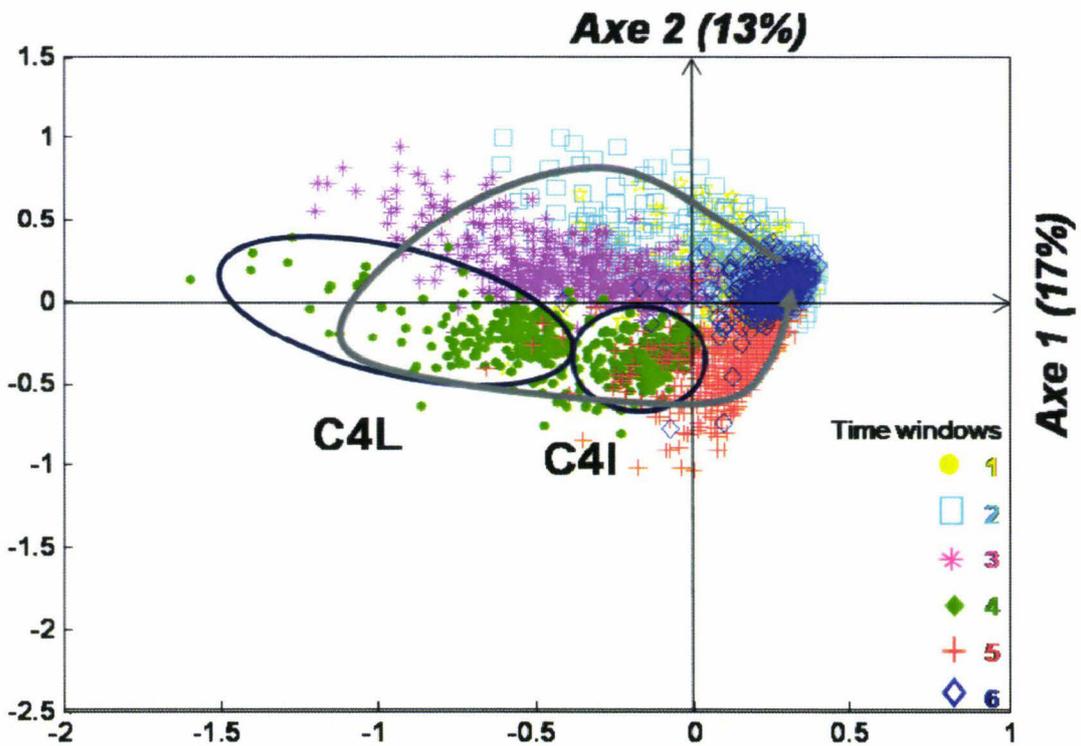
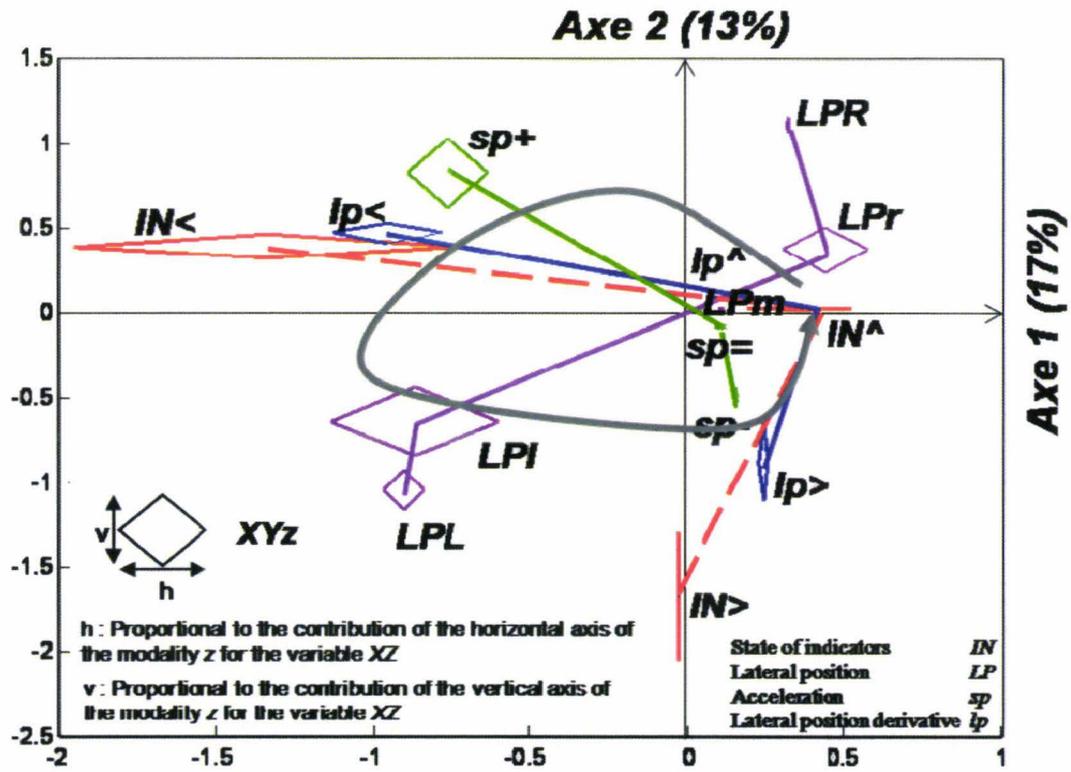


Figure 32 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections des points correspondant aux a) 34 points-colonnes (1 point par fenêtre spatiale) (toutes les modalités d'une même variable sont reliées à l'aide d'un trait plein pour une variable quantitative et d'un trait discontinu pour une variable

qualitative), b) 3042 points-lignes (1 point par triplet (i,j,k,t) , i =facteur individu, j =nombre de véhicules dans le trafic, k =modalités des véhicules, t =facteur temps)

5.1.2 Points en illustratif

L'ACM donne la possibilité de projeter des points-lignes ou des points-colonnes en illustratif. Cette fonctionnalité va nous permettre d'étudier l'influence des facteurs i, j, k et t .

Commençons l'analyse en étudiant le tableau ST^*_{j*k} dont chaque ligne correspond à une situation pour vérifier si les situations se distinguent les unes des autres. Il convient tout d'abord de noter que les différences entre les situations sont faibles puisque les points-moyens correspondant aux situations sont tous relativement proches du centre de gravité. Néanmoins, si l'on zoome sur le nuage, en haut à droite de l'axe, on retrouve les 5 situations où le véhicule de devant roule à 110 km/h alors que sur le bas de l'axe, on retrouve les situations 90 et vitesse variable (Figure 33). On peut donc supposer qu'il existe une ou plusieurs variables qui permettent de différencier ces deux groupes de situations.

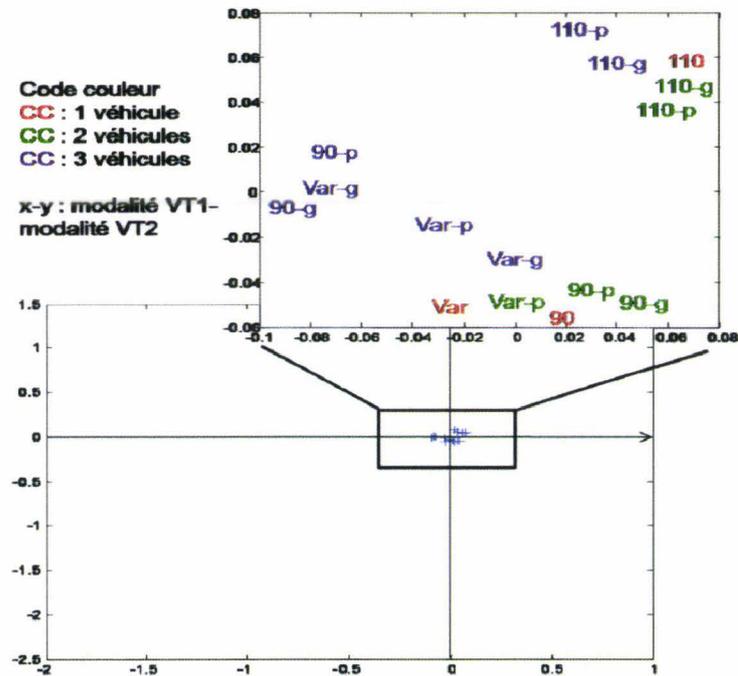


Figure 33 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 15 points lignes de ST^*_{j*k} . (un point-ligne correspond à une situation expérimentale, donc une paire (j,k))

Pour mieux comprendre cette répartition, il peut être intéressant de réintégrer le facteur temps dans l'analyse. Pour cela, il faut étudier le tableau ST^*_{j*k*T} . Pour une lecture plus aisée, il est possible de visualiser plusieurs graphes où chaque graphe va correspondre à une seule valeur de j (ce qui produit une série d'hexagones puisque qu'il y a 6 FT à présenter). Par exemple, considérons le cas $j=1$ (cas avec un seul véhicule du trafic) (figure 34), chaque hexagone représentant une modalité de k (modalité pour les véhicules VT1 et VT2). Les hexagones présentent la même allure. L'état initial (fenêtre temporelle 1) et l'instant final (fenêtre temporelle 6) sont quasi au même endroit (ici situés dans le quadrant « axe 1 positif et axe 2 positif »). Néanmoins, la trajectoire temporelle correspondant à $k=2$ (110km/h) est plus haute et plus à droite que les deux autres courbes. En conclusion, le décalage des situations 90-110 sur la première bissectrice du premier plan est homogène sur l'ensemble des fenêtres temporelles. Ce phénomène peut donc être expliqué par la position des points-modalités sur le premier plan :

Résultat 4 : Il semble que pour les situations à petite vitesse, le conducteur utilise aussi bien son clignotant gauche que droite tout en déboitant avec un coup de volant brusque et en accélérant doucement. Tandis que pour les situations à vitesse élevée, le conducteur semble utiliser plus longtemps son clignotant gauche tout en donnant un léger coup de volant pour déboiter, l'accélération du véhicule semble plus forte que pour les situations précédentes.



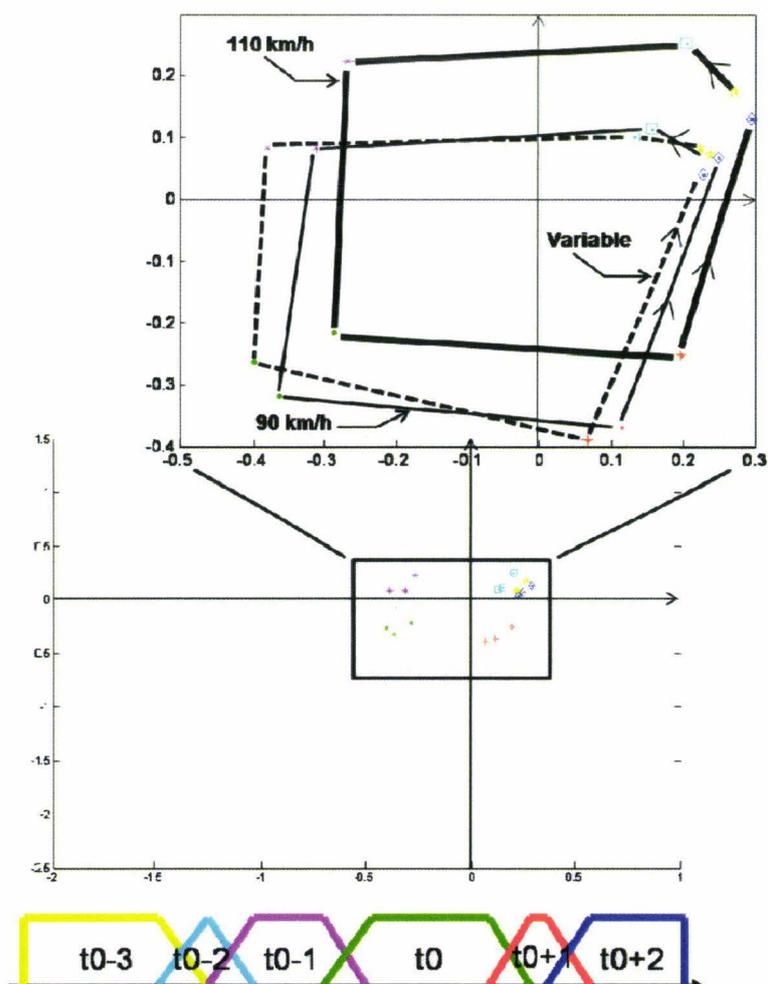


Figure 34 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux lignes du tableau $ST^*_{j \times k \times T}$ correspondant à $j=1$ (cas avec un seul véhicule). (En bas de la figure est rappelé le fenêtrage temporel ; les codes de couleurs des FT sont les mêmes que ceux de la figure 32).

On vient de voir qu'il existe une différence entre les situations 110 km/h et 90 km/h. Le facteur *vitesse du véhicule de devant* a donc une influence. Maintenant étudions le facteur *individu* pour vérifier s'il a une influence, c'est-à-dire par l'étude du tableau ST^*_l dont chaque ligne correspond à un conducteur (Figure 35).

Comme pour les situations moyennes, la projection des individus moyens sur le premier plan donne un nuage assez homogène centré sur le centre de gravité avec une dispersion cependant légèrement supérieure.

Résultat 3 : Le nuage des $l=34$ individus semble assez homogène, aucun individu ne se distingue des autres (figure 35), malgré le fait qu'il y ait deux classes de comportement dans

la fenêtre temporelle 4. Si on garde à l'esprit les 6 nuages de la figure 32a et que les points de la figure 35 sont des profils moyens, les individus semblent utiliser des stratégies de dépassement assez différentes. Ceci se vérifie sur les trajectoires moyennes de dépassement de quatre individus (individus en rouge à la figure 35) choisis pour leurs positions extrêmes par rapport au nuage (Figure 36). En se référant aux points modalités du premier plan (figure 32), les individus situés dans le quadrant supérieur gauche (par exemple individus 30 et 18) peuvent être associés aux variables $sp+$, $lp<$ et $IN<$, ce qui peut traduire une conduite assez sportive avec de fortes accélérations, des dérivées d'angles au volant plus fortes et une utilisation du clignotant plus longue (par exemple en le mettant avant et pendant le déboitement et/ou pendant que le conducteur se trouve sur la voie de gauche). Ce comportement est opposé aux individus se situant dans le quadrant inférieur droit (par exemple individus 20 et 25) qui sont plutôt caractérisés par les variables sp (= ou -), lp (^ou >) et IN (> ou ^), ce qui semble correspondre à une conduite plus « économique » dans le sens où les accélérations semblent être moins fortes, les coups de volants moins brutaux et une utilisation du clignotant seulement pour prévenir l'action future. Ces différences inter-individuelles seront étudiées de manière plus « quantitative » dans l'étape de présentation de résultats.

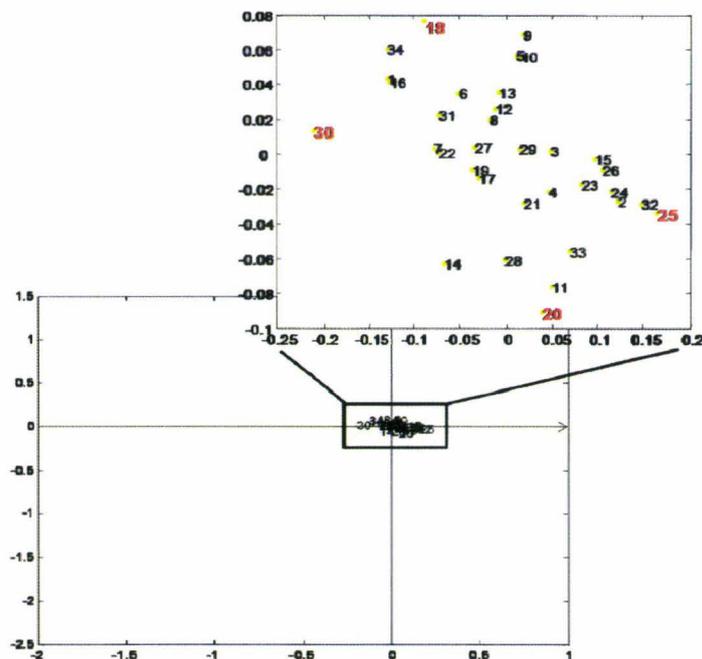


Figure 35 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 34 points lignes de ST^*_i . (un point-ligne correspond au profil moyen de l'individu i) Les sujets en rouge seront étudiés en détail lors de la prochaine étape.

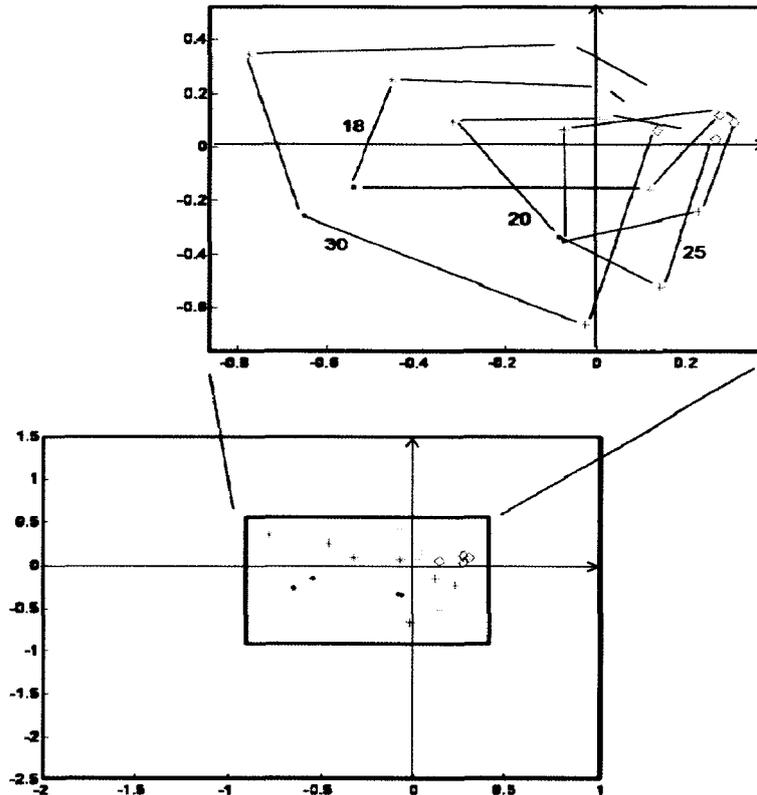


Figure 36 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 4 individus 18, 20, 25 et 30 pour les 6 fenêtres temporelles. (chaque trajectoire correspond à la moyenne des 15 situations pour un individu donné)

5.2 Etude des axes 3 et 4

L'étude des axes 3 et 4 est présentée en annexe. Retenons le résultat principal:

Résultat 5 : La tendance générale (axe 1 et 2) est que les individus accélèrent pendant la fenêtre 3 et décélèrent pendant la fenêtre 5. L'étude de l'axe 3 et 4 montre ici que quelques individus ne se comportent pas de la même façon : certains accélèrent ou décélèrent lors des autres fenêtres temporelles.

6 Etape 5 : Présentation des résultats

Indéniablement, les sorties – graphiques et tableaux d'aide à l'interprétation – de l'ACM sont complexes à interpréter pour quelqu'un qui connaît peu ou ne connaît pas la méthode ; en fait ils sont là pour faire ressortir les phénomènes saillants présents dans une grande base de données, qui plus est MFMV. En outre, les distances entre points ne permettent pas de rendre compte des écarts entre les valeurs physiques des variables prises

individuellement (angle volant, vitesse, distance inter-véhicules, ...). L'idée est alors de considérer une cinquième et dernière étape afin de montrer et d'expliquer les phénomènes mis en évidence par l'ACM à l'aide de graphiques plus simples à interpréter (méthodes des cases 1 et 2 de la figure 15 du chapitre II). Ce paragraphe reprend alors les principaux résultats issus de l'ACM et les illustre au moyen de graphiques que nous avons voulu les mieux adaptés possibles au phénomène dont il faut rendre compte.

Dans cette optique, nous avons suivi les principes de base de spécialistes de la *graphique* ([Bertin, 1977] et [Tufté, 1983]) tout en respectant les recommandations des spécialistes de l'ergonomie des interfaces [Gillian *et al*, 1998]. En outre, nous avons puisé dans les multiples méthodes de la statistique descriptive mono, bi ou trivariée ([Saporta, 2006] et [Falissard, 1998]).

Donc, si l'ACM est effectuée à partir de valeurs d'appartenance, les valeurs considérées ici proviendront du tableau Y_{2ijk} , qui sont les valeurs initiales de la base de données, moyennées par fenêtre temporelle. Ce tableau est composé de 3042 lignes et 11 colonnes. Reprenons les résultats évoqués dans l'étape précédente.

6.1 *Tendance générale*

6.1.1 **Gestion de l'accélération du véhicule lors des différentes phases d'un dépassement**

Résultat 1 : L'objectif est de montrer ici l'évolution de trois variables qui contribuent fortement au positionnement de l'axe 1, à savoir IN , lp et sp , pendant les différentes fenêtres temporelles. Il faut donc faire appel à une figure capable de montrer simultanément 3 variables et le facteur temps. En s'inspirant des outils graphiques de [Bertin, 1977], les deux variables quantitatives seront figurées, de manière usuelle, par les axes horizontal et vertical, la variable qualitative (le clignotant) par un attribut graphique (un triangle dont on fait varier l'orientation) ; pour le facteur temps (6 FT), nous prendrons également un attribut graphique (la couleur, dont la convention est identique à celle utilisé pour le plan factoriel, figure 32.b). Ceci peut être fait par la figure 37. Cette figure montre qu'en général le conducteur accélère principalement (valeurs positives sur l'axe des ordonnées) lorsqu'il se déplace vers la gauche de la chaussée (valeurs négatives sur l'axe des abscisses) tout en activant son clignotant gauche. La tendance s'inverse lorsque le conducteur se déplace vers la droite, dans ce cas il décélère et met son clignotant droit, c'est par exemple le cas pour le triplet (17,1,1).

Néanmoins, quelques points indiquent que le conducteur se déplace vers la droite et décélère tout en allumant son clignotant gauche. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour construire cette figure, nous avons compté le nombre de fois que le conducteur allumait son clignotant droit ou gauche et nous avons affiché la modalité du clignotant qui apparaissait le plus souvent pour une fenêtre temporelle. Par exemple, pour le triplet (30,1,4), le conducteur $i=30$ a allumé son clignotant gauche durant la fenêtre temporelle 2 et ne l'a éteint qu'au milieu de la fenêtre 5 pour mettre son clignotant droit. Ce dernier est donc resté allumé moins longtemps (ce qui explique le triangle pointant vers la gauche).

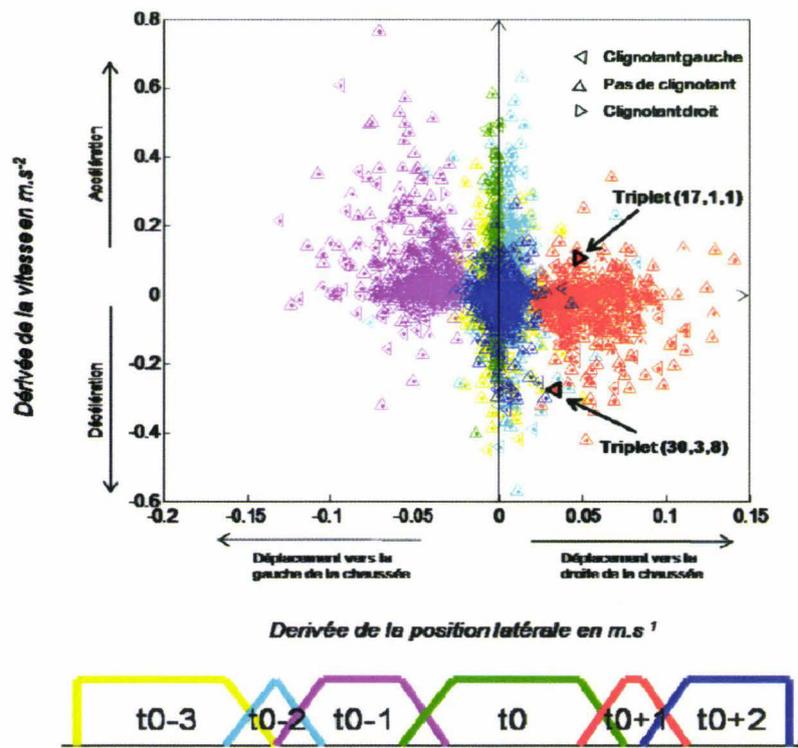


Figure 37 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de l'accélération du véhicule et de l'utilisation du clignotant lors des changements de voies. Triplet (17,1,1) : Individu 17 lors d'une situation à un seul véhicule roulant à 90 km/h. Triplet (30,3,8) : Individu 30 lors d'une situation à trois véhicules avec le véhicule de devant roulant à 90 km/h et celui de derrière gardant une grande interdistance.

Résultat 5 : La tendance générale (axe 1 et 2) est que les individus accélèrent pendant la fenêtre 3 et décélèrent pendant la fenêtre 5, ce qui fait l'objet du résultat 1. Néanmoins, l'étude des axes 3 et 4 montre que quelques individus n'utilisent pas cette stratégie lors du dépassement. Dans le plan des points-lignes, nous avons choisi 3 individus dont le comportement semble différent de cette tendance générale. Le premier se trouve en haut à

gauche, le deuxième en bas à gauche et le dernier à droite. Les axes sont essentiellement construits par les variables TP , sp et tp , elles vont donc nous aider à décrire le comportement du conducteur. De plus, interviennent une variable TP et sa dérivée tp , ce qui peut aboutir à la construction d'un plan de phase qui est un outil graphique classique en automatique. La figure 38 représente en abscisses la variable TP , en ordonnée sa dérivée tp et nous allons projeter les points en utilisant le code de couleurs des fenêtres temporelles pour montrer l'évolution temporelle des trois individus pour la situation $j=1$ (cas avec un seul véhicule) et $k=1$ (vitesse de $VT1 = 90\text{km/h}$).

En observant le plan de phase, il est possible d'interpréter le comportement des conducteurs en raisonnant par analogie avec un correcteur PID :

- Pour maintenir sa vitesse, l'individu $i=12$ accélère et décélère fortement : il réagit rapidement aux variations de vitesse (gain élevé sur l'action dérivée) par contre ses mouvements ne sont pas précis (gain faible sur l'action intégrale). Il réagit fortement aux perturbations.
- Pour maintenir sa vitesse, l'individu $i=29$ accélère et décélère légèrement, on est en présence d'un bon compromis entre précision, stabilité et rapidité, il réagit assez bien à la perturbation.
- Quoiqu'il arrive, l'individu $i=26$ arrive à maintenir sa vitesse sans accélération ni décélération. Il ignore la perturbation (gain faible sur l'action dérivée, gain élevé sur l'action intégrale), ce comportement s'oppose au comportement de l'individu $i=12$.

En conclusion de ces observations, on peut dire que 2 de ces 3 individus ont un comportement qui soulèvent un certain nombre d'interrogations par rapport à la sécurité. C'est le cas des individus $i=12$ et $i=26$. L'individu $i=12$ réagit rapidement aux perturbations, ce qui est un avantage s'il doit faire face à une situation d'urgence, par contre le fait que ses mouvements soient imprécis et assez brutaux font que sa réaction puisse être disproportionnée pour faire face au problème. L'individu $i=26$, ignore totalement la « perturbation » induite par le dépassement, on peut s'interroger quant à son comportement face à une situation potentiellement dangereuse. Si des informations viennent l'alerter d'une situation potentiellement dangereuse, ne risque-t'il pas de retarder son action, voir ne pas les traiter du tout et ainsi se retrouver rapidement en situation de risque avéré ? Pour un opérateur humain comme pour un correcteur, réagir trop rapidement et trop brutalement ou ne pas réagir du tout

n'est pas bon, notamment dans notre cas pour assurer la sécurité. Il faut un juste compromis entre une réaction rapide et des mouvements précis, l'individu $i=29$ en est un exemple.

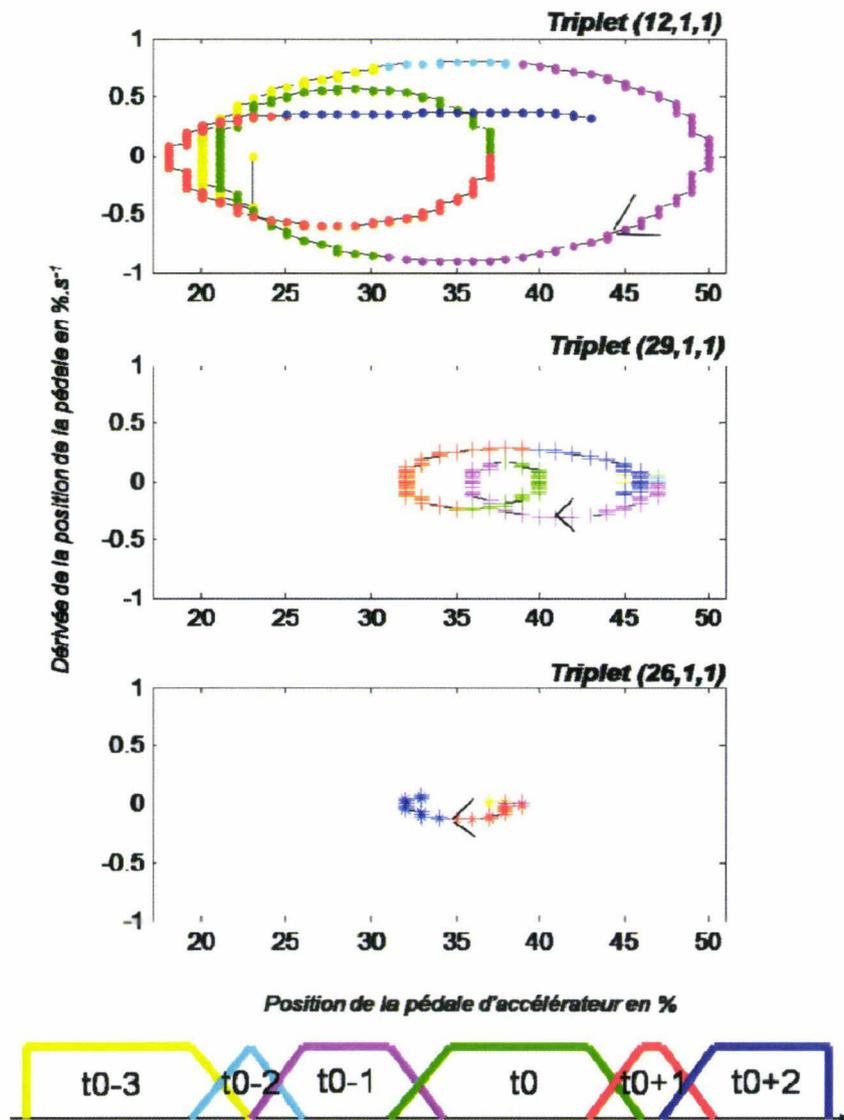


Figure 38 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de la variable TP par rapport à sa dérivée tp pour 3 individus ($i=12, 29$ et 26) pour la situation $j=1$ (cas avec un seul véhicule) et $k=1$ (vitesse de $VT1=90\text{km/h}$). a) Triplet $(12,1,1)$. b) Triplet $(29,1,1)$. c) Triplet $(26,1,1)$.

6.1.2 Gestion du clignotant lors du dépassement

Résultat 2 : Dans la fenêtre 4, deux groupes d'individus se distinguaient (voir figure 32). Nous avons étudié comment ces deux groupes utilisaient leurs clignotants, pour cela, nous avons tout d'abord cherché un élément pour séparer ces deux groupes, qui est l'abscisse de l'axe 1

de l'ordre de -0,35. Sur les 507 triplets (i,j,k) , 282 triplets font partie du groupe de droite ($C4I$) et 225 triplets du groupe de gauche ($C4L$). Il semblerait que les individus du nuage $C4L$ utilisent plus fréquemment leur clignotant que les individus du nuage $C4I$ (figure 39, partie en vert).

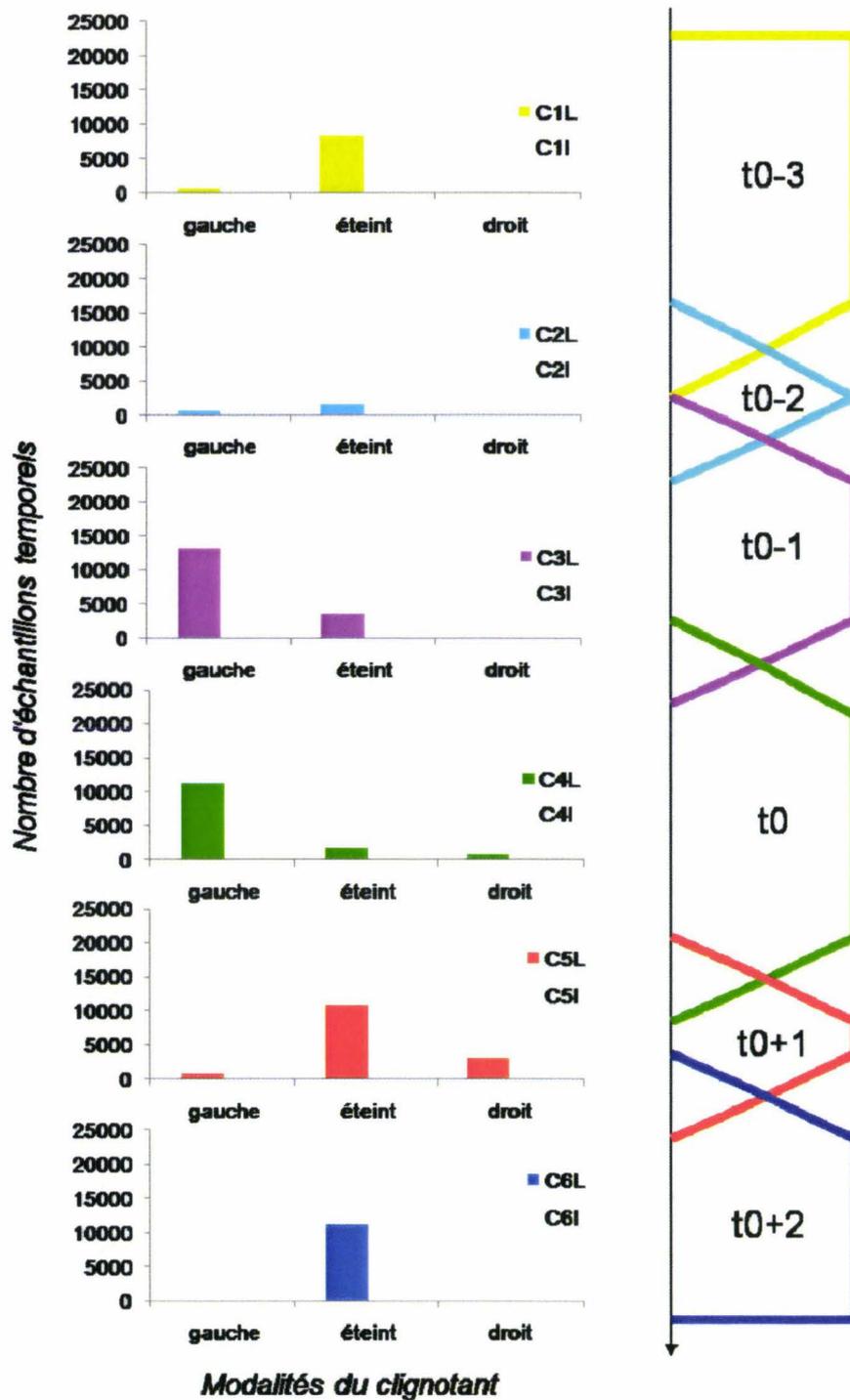


Figure 39 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'utilisation du clignotant lors des six fenêtres temporelles.

6.2 Influence du facteur situation

Résultat 4 : Dans l'étape précédente, nous avons constaté que les situations 110 km/h se différenciaient des situations 90 km/h et vitesse variable. Ensuite, nous avons intégré le facteur temps et nous nous étions focalisés sur les situations à un seul véhicule pour ne pas compliquer l'analyse. Les figures 33 et 34 ont montré que la situation 110 km/h était plutôt située dans le quadrant supérieur droit alors que les deux autres situations étaient situées vers le bas et plus vers la gauche. Cette position peut s'expliquer par le positionnement des points modalité dans le plan des axes 1 et 2. Regardons globalement comment ces variables se comportent pour les situations à un seul véhicule en moyennant sur le facteur *individu* et le facteur *temps* (les situations vitesse variable ne seront pas intégrées à cause de l'ambiguïté qu'elles présentent sur la vitesse du véhicule qui précède). La figure 40 montre qu'une seule des 4 variables semble différente entre les situations 90 et 110. Il s'agit de la variable *sp*, lors des situations 110, il semble y avoir plus d'accélération et de décélération que lors des situations 90. Notons qu'il est possible qu'une différence existe pour les autres variables mais que le fait de moyennner ait rendu les histogrammes identiques.

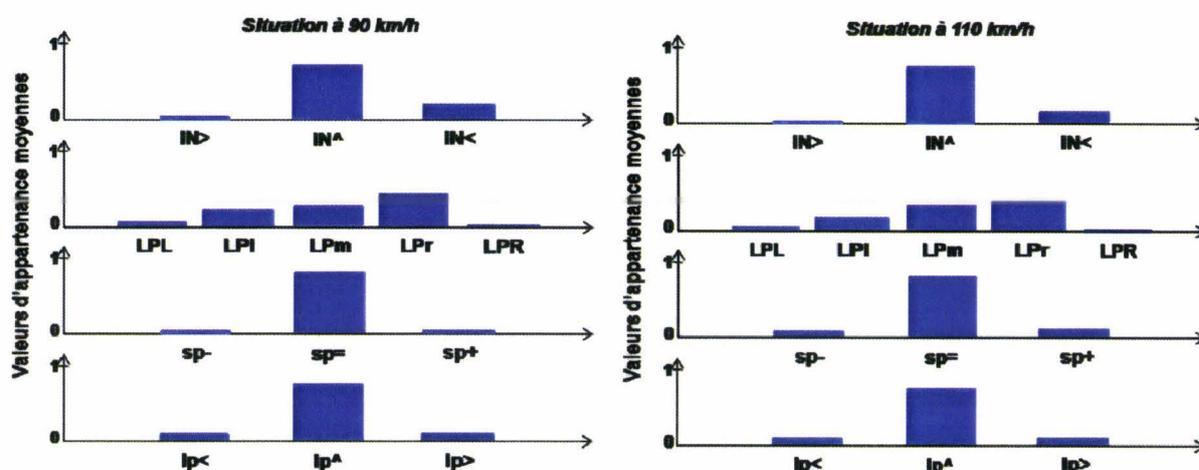


Figure 40: Proposition de représentation graphique pour montrer les différences de distribution pour deux situations avec un seul véhicule a) Situation 90. b) Situation 110.

La variable qui différencie le plus ces deux situations semble être *sp*. Il serait intéressant de tracer un plan de phase pour un individu donné afin d'étudier de manière plus quantitative cette différence. Pour cela, nous avons à notre disposition la variable *TP* (pour Throttle Pedal, exprimée en %) et sa dérivée *tp*, dont l'évolution est très proche de la variable *sp*. La figure ci-dessous montre en effet que pour l'individu $i=9$, l'évolution temporelle de la variable *TP* par rapport à sa dérivée est différente pour les deux situations à un seul véhicule.

Pour les situations 90 km/h, la position sur la pédale d'accélérateur semble être plus ou moins constante avec une vitesse d'enfoncement oscillant autour de zéro. Tandis que pour les situations 110 km/h, l'individu $i=9$ appuie et relâche la pédale plus fort et avec des vitesses plus importantes que pour les situations 90 km/h. Ce phénomène peut être expliqué grâce à la variable SV qui est le différentiel de vitesse avec le véhicule précédent. En effet, le conducteur roule en moyenne à 130 km/h. Le véhicule de devant roule soit à 90 soit à 110 km/h, les différentiels de vitesse sont donc respectivement de 40 et de 20 km/h. On peut supposer que plus le différentiel de vitesse est petit, plus le conducteur ressent le besoin d'accélérer pour ne pas que la manœuvre de dépassement dure trop longtemps. Ce qui peut expliquer la différence d'accélération entre les situations 90 et 110 km/h. Ce qui est plus étonnant est que pour les situations 90 km/h, le conducteur ressent quand même le besoin d'accélérer, même légèrement, bien que le différentiel de vitesse soit déjà très important (40 km/h). Il semblerait que la manœuvre de dépassement réponde à l'exécution d'une procédure standard, toujours respectée incluant une phase d'accélération et une de décélération même si le différentiel de vitesse ne le justifie pas. Ce comportement standardisé est d'ailleurs visible sur les tous premiers plans factoriels.

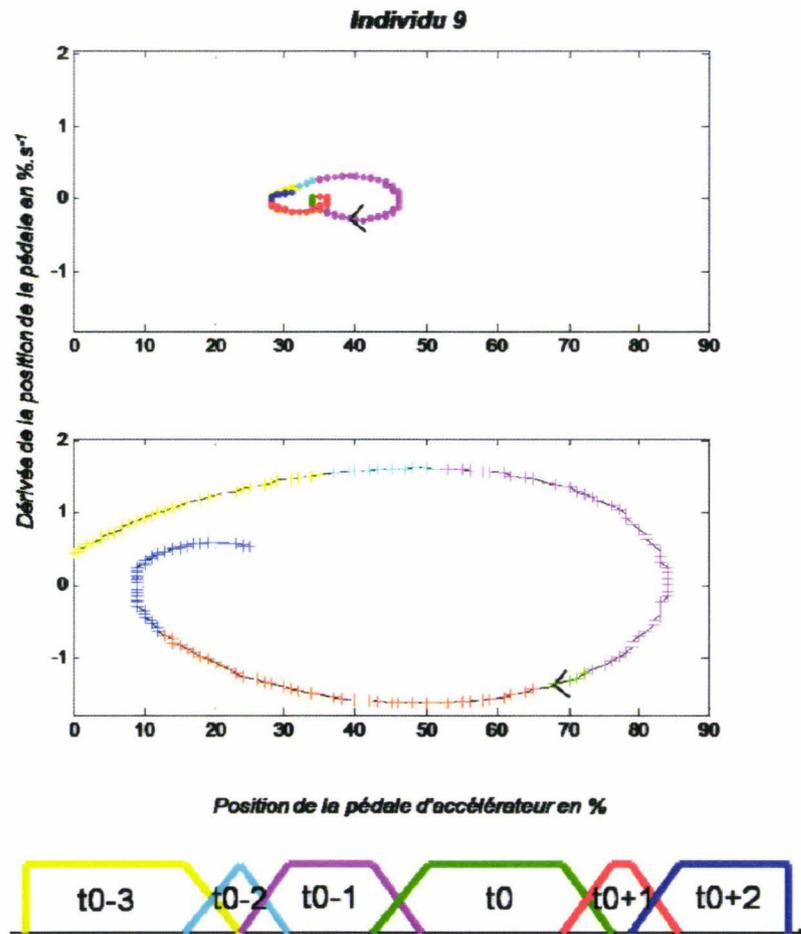


Figure 41: Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de la variable TP par rapport à sa dérivée tp pour l'individu $i=9$ pour la situation $j=1$ (cas avec un seul véhicule). a) $k=1$ (vitesse de $VT1=90\text{km/h}$). b) $k=2$ (vitesse de $VT1=110\text{km/h}$).

6.3 Influence du facteur individu

Résultat 3 : Le plan des points-lignes projetés en illustratif n'a pas montré de classes de comportements mais des différences inter-individuelles matérialisées par l'éloignement des points-lignes les uns par rapport aux autres. Il faut donc s'intéresser aux variables qui ont contribué à construire les axes 1 et 2 pour pouvoir expliquer leurs positionnements. Ces variables sont essentiellement pour l'axe 1 le clignotant IN , la dérivée de la position latérale lp et la dérivée de la vitesse sp et pour l'axe 2 la position latérale LP . Prenons l'exemple avec les 4 individus $i=18, 20, 25$ et 30 que nous avons retenus précédemment car situés à chaque extrémité des axes et étudions leurs stratégies de dépassement à l'aide de ces variables. L'ACM ayant en entrée des valeurs d'appartenance, traçons, pour commencer, les valeurs d'appartenance moyennes pour ces 4 variables. Ceci revient à construire un histogramme, ce

qui va permettre d'étudier la différence entre les profils des conducteurs en moyennant sur le facteur *temps* et le facteur *situation* (Figure 42). Il apparaît que les différences existent essentiellement au niveau des variables *IN* et *sp*. En effet, pour les individus se situant dans le quadrant supérieur gauche, il semble qu'il y ait plus d'accélération et de décélération et que le clignotant gauche soit utilisé plus longtemps. En ce qui concerne la variable *lp*, il ne semble pas y avoir de différence entre ces 4 individus. Peut être existe-t-il une différence de distribution pour cette variable entre les 15 situations et que le fait de moyenner sur ces 15 situations aient rendu les distributions très similaires. Pour vérifier cette hypothèse, il serait intéressant de reprendre ces 4 variables et d'étudier comment elles se comportent pour chacune des 15 situations. Par manque de place, nous ne vérifierons ici qu'une seule situation.

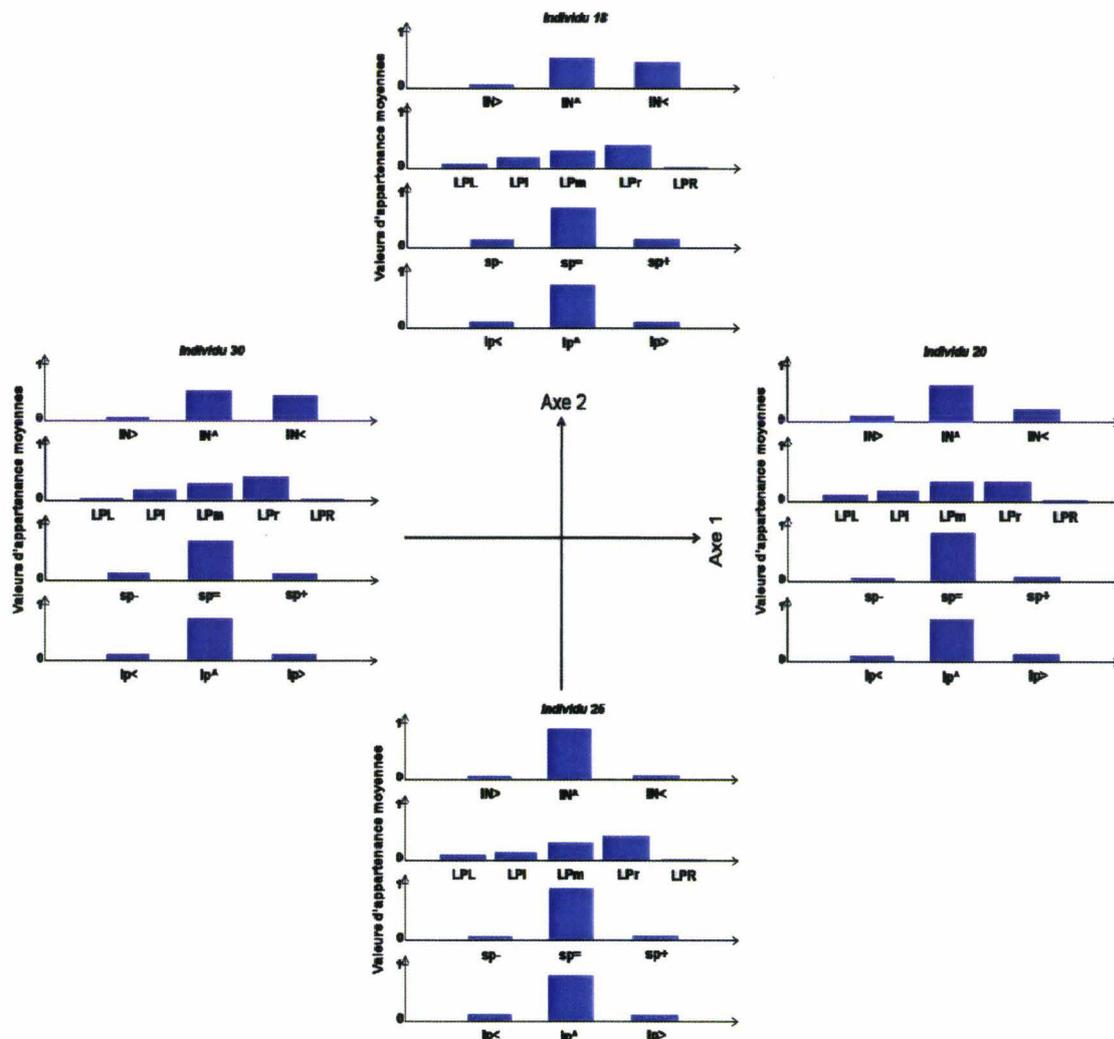


Figure 42: Proposition de représentation graphique pour montrer quelques profils de conduite différents (individus $i=18, 20, 25$ et 30 situés aux extrémités des axes).

Une situation particulière (figure 43, l'exemple correspond à $j=3$ (3 véhicules du trafic interviennent) et $k=4$ (le véhicule de devant roule à 90 km/h et celui de derrière laisse une faible interdistance avec le véhicule sujet) a été choisie et pour chaque individu, l'étude de l'évolution temporelle de chacune des variables permet d'identifier la stratégie de conduite utilisée lors du dépassement:

- *Stratégie de l'individu $i=30$* : il allume son clignotant gauche dès qu'il déboite et ne l'éteint que lorsqu'il allume le clignotant droit pour se rabattre. L'angle au volant varie fortement (alternance de coups de volants à droite puis à gauche). Il alterne accélération et décélération tout au long de la manœuvre qui semble assez courte.
- *Stratégie de l'individu $i=25$* : le clignotant gauche n'est utilisé que pour signaler le déboitement imminent puis éteint, il en est de même pour le clignotant droit. L'angle au volant varie légèrement. Il accélère doucement juste avant le déboitement. La manœuvre semble très courte.
- *Stratégie de l'individu $i=18$* : il utilise les clignotants de la même façon que l'individu $i=30$. Il alterne les coups de volant à droite et à gauche et une décélération suivie d'une accélération jusqu'à la fin du déboitement. De plus, sa manœuvre semble assez longue.
- *Stratégie de l'individu $i=20$* : sa stratégie ressemble à celle de l'individu $i=25$ mise à part que sa manœuvre semble assez longue et son accélération/décélération est quasi nulle.

Les stratégies décrites ci-dessus au vu des signaux se retrouvent parfaitement sur les trajectoires de ces 4 individus projetées dans le plan des axes 1 et 2 (figure 36). Les trajectoires des sujets 20 et 25 sont compactes et proches du centre de gravité, montrant une conduite plus souple exempte de grandes variations de vitesse ou de position. Les trajectoires des sujets 18 et surtout 30 sont au contraire très grandes et largement décalées sur la gauche du premier axe, ce qui traduit une conduite plus brutale avec d'importantes variations dans la vitesse et la position latérale ainsi qu'une stratégie différente dans l'utilisation du clignotant pendant la manœuvre.

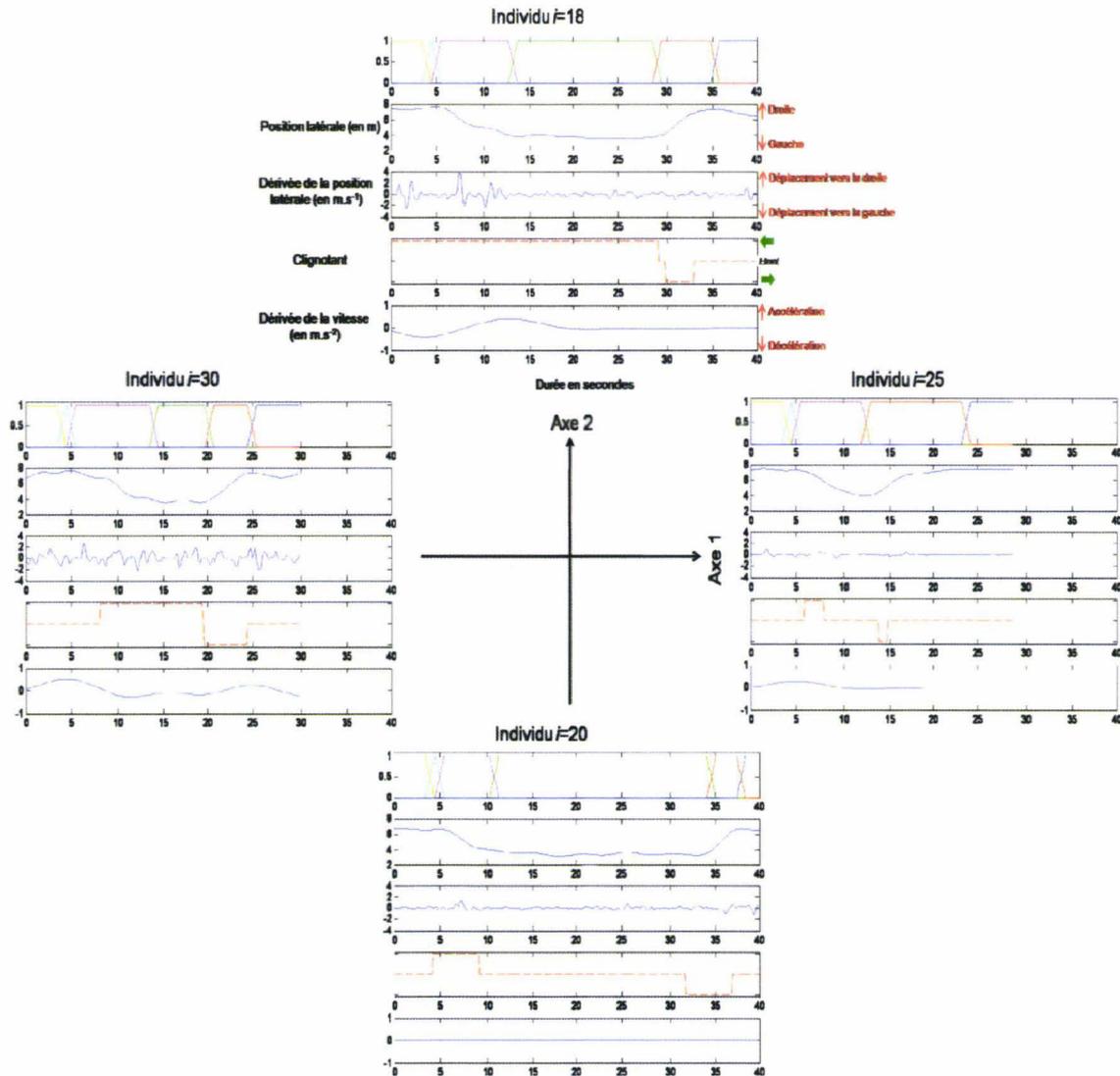


Figure 43 : Proposition de représentation graphique pour montrer quelques stratégies utilisées lors des manœuvres de dépassement lors des situations faisant intervenir 3 véhicules où le véhicule de devant roule à 90 km/h et celui de derrière laisse une petite interdistance avec le véhicule sujet.

Les figures 37 à 43 précédentes ont permis de mettre en exergue des tendances comportementales globales (figures 37 à 39) sans pour autant occulter l'existence de fortes disparités inter-individuelles (figures 40 à 43). Ces figures sont en accord avec celles issues de l'ACM (plans croisant les axes 1 et 2 puis les axes 3 et 4). Avant d'évoquer les possibilités de poursuite de l'analyse statistique (approche inférentielle, notamment) et du SCVE (système conducteur-véhicule-environnement), faisons une synthèse de ce chapitre.

7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la mise en pratique de la méthodologie en 5 étapes décrite dans le chapitre 2 dans le contexte de la conduite automobile. De la mise en œuvre de cette méthodologie, deux ensembles de conclusions sont à considérer.

Le premier ensemble porte sur la façon d'arriver aux résultats. Rappelons que l'on partait d'une base de données MultiFactorielle et MultiVariée (MFMV) mise sous forme d'un parallélépipède à 507 cases, chacune d'elles contenant un signal multidimensionnel à 12 composantes. Il est alors indéniable que le passage de cette base initiale à un ensemble de résultats a été long et complexe. En effet le fait de vouloir garder l'aspect MV mais aussi le facteur individu rend beaucoup plus complexe l'analyse statistique, notamment par rapport à une approche nettement plus classique consistant à considérer les dispersions inter-individuelles comme des « résidus aléatoires » et effectuer des analyses univariées (comme les tests inférentiels à base d'analyse de variance pour tester l'influence des facteurs sur les variables ou les relations entre les variables). Il est alors à constater que, souvent, les analyses MFMV basées sur une approche multidimensionnelle (méthodes factorielles ou de classification) ne montrent que les plans factoriels. Pour notre part, nous avons cherché, via une étape supplémentaire (la cinquième), à décrire quelques phénomènes saillants issus de l'ACM via des graphiques spécifiques. Un premier enseignement de l'analyse MFMV menée ici est que les multiples allers et retours entre les données initiales, les valeurs d'appartenance, les sorties de l'ACM et ces vues graphiques sont d'une grande richesse, tant sur le plan de la Statistique que sur celui de l'étude du dépassement et qu'il est « frustrant » que, pour des raisons de place limitée nous ne puissions donner ici dans leur totalité.

Le second ensemble de conclusions porte sur les résultats proprement dits, c'est-à-dire ceux donnés ici (on gardera à l'esprit que, parmi les multiples possibilités offertes par les modèles mathématiques, graphiques et verbaux, nous nous sommes principalement focalisés sur les deux dernières catégories et que les difficultés rencontrées à chaque étape de l'analyse statistique ont été expliquées ainsi que les choix qui ont du être fait). Ces remarques étant faites voici les résultats les plus intéressants :

- Même s'il apparaît logique que lors des phases de déboitement le conducteur prenne de la vitesse et lors des phases de rabattement le conducteur décélère pour reprendre sa vitesse de croisière, ce n'est pas le cas pour une minorité de conducteurs. En effet, certains roulent à vitesse constante lors de toute la manœuvre ou bien jouent très

souvent avec la pédale d'accélérateur ce qui fait qu'ils alternent accélération-décélération et ce à n'importe quel moment du dépassement.

- L'utilisation du clignotant gauche divise les conducteurs : certains le laissent activé durant toute la phase de dépassement alors que d'autres ne l'activent que juste avant le déboitement. Il en est de même pour le clignotant droit lors du rabattement. Il a même été constaté qu'une toute petite minorité de conducteurs ne le mettait pas pour prévenir les autres usagers.
- Même si le différentiel de vitesse avec le véhicule de devant est grand et qu'il n'est pas nécessaire d'accélérer, le conducteur garde en général cette stratégie qui est d'accélérer pour déboiter et de décélérer pour se rabattre.
- Dans la population testée qui a été choisie pour être la plus homogène possible, sont néanmoins apparues des différences interindividuelles au niveau des comportements de conduite. Deux types de conduite ont pu être identifiés : une conduite plutôt sportive avec de grandes variations de vitesse et de position latérale et une conduite plutôt économique avec des variations plus faibles.

Dans le dernier chapitre, la démarche décrite tout au long de ce mémoire sera rappelée succinctement, un bilan du travail réalisé sera dressé et les perspectives de recherche seront abordées.

V Bilan et perspectives

1 Introduction

Ce chapitre présente un bilan du travail qui a été réalisé dans ce mémoire ; ce bilan rappelle la démarche utilisée, tant sur le plan de l'obtention des données que sur celui de leur exploitation. Ensuite nous proposerons des perspectives de travail pour améliorer le déroulement de l'expérimentation et enrichir la base de données, perspectives qui permettraient d'aller plus loin dans l'analyse.

2 Bilan

2.1 Démarche

Située dans le cadre de l'étude du système à composante humaine (SCH), l'objectif de cette thèse est de proposer une démarche d'accroissement des connaissances reposant sur une approche expérimentale (par rapport à une approche basée sur l'observation, comme l'accidentologie). Dans ce contexte, se pose donc le problème de la construction de l'expérience et de l'exploitation statistique MultiFactorielles et MultiVariables (MFMV). L'étude des données expérimentales s'appuie sur un enchaînement d'étapes — 1) caractérisation, 2) codage, 3) mise sous forme de tableaux, 4) exploitation des tableaux et 5) présentation des résultats — et permet d'étudier les effets des facteurs sur les variables mesurées et les relations entre les variables.

Afin d'illustrer cette méthodologie, nous nous sommes d'abord intéressés au recueil de données. Ces données proviennent du système Conducteur-Véhicule-Environnement (SCVE). Comme la conduite automobile offre une très grande diversité de situations complexes à étudier, un choix a été fait et s'est porté sur les manœuvres de dépassement sur les réseaux autoroutiers, manœuvres qui peuvent être dangereuses étant donnée la vitesse élevée et le problème des angles morts. Cette étude pourrait permettre de trouver des éléments d'information pour alimenter un système d'aide au dépassement, sachant que les systèmes existant donnent des informations en continu même quand le conducteur n'a pas l'intention de dépasser et donc tendent à augmenter inutilement la charge de travail du conducteur. C'est pour cela qu'il serait intéressant de détecter dans les actions du conducteur des modifications

spécifiques à la manœuvre de changement de voie pour faciliter son anticipation par le système.

L'objectif de l'expérimentation est alors de faire interagir le conducteur avec d'autres véhicules du trafic afin d'observer son comportement durant ces phases de dépassement. Le choix s'est porté à 3 véhicules du trafic afin d'avoir suffisamment de données à exploiter et de ne pas avoir une trop grande combinatoire. Le premier véhicule VT1 est placé devant le véhicule sujet avec 3 modalités de vitesse : 90km/h, 110 km/h ou variable. Le second véhicule VT2 suit le véhicule sujet en gardant une interdistance soit de 0.5 secondes soit de 1.5 secondes de manière à pousser le véhicule sujet à dépasser. Le véhicule VT3 permet de gêner le véhicule sujet lorsque ce dernier va entreprendre le dépassement du véhicule VT1. Il déboîte quand le véhicule sujet arrive à 150 mètres du véhicule VT1. Le plan d'expérience a été défini afin d'avoir trois types de situations de dépassement différentes : 3 situations avec un seul véhicule, 6 situations avec deux véhicules et 6 situations avec trois véhicules. L'ordre des 15 situations a été contrebalancé pour éviter l'effet d'apprentissage. Pour que les situations soient reproductibles et que le participant soit en sécurité, nous avons utilisé le simulateur de conduite SHERPA. Nous avons recueilli quatre types de données : les données objectives SHERPA, les données physiologiques, les données « vidéo » et les questionnaires.

Dans le cadre de cette thèse, seules les données objectives provenant du simulateur ont été analysées. En effet, d'une part ces données sont multiples et complexes, d'autre part, les données physiologiques se sont avérées inexploitable (cf. chapitre III) et les questionnaires seront analysés dans un deuxième temps.

Notre méthodologie en 5 étapes s'appuie principalement sur le découpage spatio-temporel pour caractériser les signaux multidimensionnels et sur l'Analyse en Correspondances Multiples. L'approche est exclusivement descriptive dans un premier temps, ceci pour ne pas faire d'hypothèses a priori sur les données et vérifier leur véracité. Les résultats principaux sont alors les suivants.

2.2 Résultats de l'analyse descriptive MFMV

Cette méthodologie nous a permis de mettre en évidence quelques comportements du conducteur lors des situations de dépassements qui montrent très nettement les différences inter et intra-individuelles.

Il apparaît logique que lors des phases de déboitement le conducteur prenne de la vitesse et lors des phases de rabatement le conducteur décélère pour reprendre sa vitesse de croisière. Ceci est le cas pour grand nombres de conducteurs. [Salvucci et Liu, 2002] ont, quant à eux, montré un comportement équivalent : les conducteurs ralentissent légèrement avant le moment de déboîter, accélèrent peu après et maintiennent cette vitesse jusqu'au rabatement puis ils décélèrent pour revenir à leur vitesse de croisière. Cependant, certains de nos conducteurs n'ont pas adopté cette stratégie. En effet, certains roulent à vitesse constante lors de toute la manœuvre, ce qui peut ressembler au comportement « Flying » dans la classification de [Hegeman *et al*, 2005] ou bien jouent très souvent avec la pédale d'accélérateur ce qui fait qu'ils alternent accélération-décélération à n'importe quel moment du dépassement.

L'utilisation du clignotant gauche divise les conducteurs : certains le laissent activé durant toute la phase de dépassement alors que d'autres ne l'activent que juste avant le déboitement. Il en est de même pour le clignotant droit lors du rabatement. Il a même été constaté qu'une toute petite minorité de conducteurs ne le mettaient pas pour prévenir les autres usagers. Du fait de cette grande diversité à propos de l'utilisation du clignotant, il serait difficile de prendre en compte l'information donnée par les clignotants pour alimenter un système d'aide au dépassement.

Lors des manœuvres de dépassement d'un véhicule, le conducteur garde en général la même stratégie, qui est une accélération lors du déboitement et une décélération lors du rabatement quelle que soit la vitesse du véhicule de devant. En effet, ceci a été constaté en comparant des situations où le véhicule de devant est à 90 et 110 km/h. Si on fait l'hypothèse que le conducteur roule à 130 km/h, le différentiel de vitesse est respectivement de 40 et de 20 km/h et il n'est donc pas nécessaire d'accélérer pour un si grand différentiel de vitesse. D'où la conclusion que la manœuvre de dépassement répond à l'exécution d'une procédure standard, quasiment toujours respectée incluant une phase d'accélération et une de

décélération même si le différentiel de vitesse ne le justifie pas. Ce résultat pourrait s'avérer très utile pour permettre l'anticipation de la manœuvre de dépassement.

Dans la population testée qui a été choisie pour être la plus homogène possible, sont néanmoins apparues des différences interindividuelles au niveau des comportements de conduite. Deux types de conduite ont pu être identifiés : une conduite plutôt sportive avec de grandes variations de vitesse et de position latérale et une conduite plutôt économique avec des variations plus faibles.

Les résultats issus d'un chemin d'analyse descriptive MFMV (cf. IV) étant des tendances quant à l'influence des facteurs et les relations entre variables, il serait intéressant de le prolonger en faisant appel à la statistique inférentielle (voir partie 5.3 du chapitre 2).

2.3 Vers une analyse confirmatoire

Si comme avec l'analyse descriptive, 5 étapes doivent être suivies, quelques remarques fondamentales s'imposent. En présence

- De 507 quadruplets (i,j,k,t) de combinaisons de modalités de facteurs (pour rappel : i = facteur individu ($i=1,\dots,34$), j = nombres de véhicules qui interagissent avec le véhicule du participant ($j=1,\dots,3$), k = modalités des différents véhicules du trafic ($k=1,\dots,9$) et t = fenêtre temporelle ($t=1,\dots,6$)) et
- de $V=12$ variables, 11 étant quantitatives et une qualitative (clignotant),

Le chemin d'analyse descriptive MFMV a mis en exergue 2 grandes catégories de résultats :

- C1, effets des facteurs sur les variables ;
- C2, relations entre les variables ;

sachant que pour chaque catégorie, deux types de résultats peuvent être présents,

- pour C1, influence ou non influence d'un facteur sur une variable ;
- pour C2, relation ou non relation entre 2 variables.

La première remarque est que, face à la grande combinatoire de tests inférentiels possibles répondant aux catégories C1 et C2, il n'est bien entendu pas possible de les effectuer tous. En outre, la combinatoire est encore plus forte si l'on garde à l'esprit l'aspect MFMV. A titre illustratif indiquons que, pour C1, il est possible d'envisager deux cas : test monovarié (MF1V) ou test multivarié (MFMV) ; par exemple via l'analyse de la variance (monovarié) (souvent dénommée par le sigle ANOVA pour ANalysis Of VAriance) ou l'analyse de la variance multivarié (MANOVA, Multivariate ANalysis Of VAriance) [Johnson et Wichern, 1992], respectivement, si, notamment, l'hypothèse de normalité est vérifiée.

Ici, nous ne nous intéresserons qu'à la vérification de quelques phénomènes mis en exergue par l'analyse descriptive MFMV à l'aide de méthodes inférentielles et nous resterons dans le contexte le plus utilisé dans le domaine des facteurs humains quant à l'étude des effets, à savoir les tests monovariés. Passons à la description des 5 étapes du chemin de l'analyse inférentielle (1. caractérisation, 2. codage, 3. mise sous forme de tableaux, 4. exploitation des tableaux et 5. présentation des résultats).

Concernant la phase de caractérisation, l'optique d'utiliser des tests classiques de la statistique inférentielle fait qu'il faut faire intervenir des indicateurs « classiques » (moyenne arithmétique, écart-type, valeur efficace, ...) plutôt que des indicateurs relatifs à des fenêtres spatiales (FS). Bien entendu, la notion de fenêtre temporelle (FT) peut être gardée. Notamment, les tests vont porter sur les différences de comportements du conducteur avant et pendant le dépassement. Considérons deux nouvelles fenêtres *FTavant* correspondant aux instants avant le déboitement (combinaison des fenêtres FT1 et FT2) et *FTpendant* correspondant au moment du déboitement et au dépassement du véhicule de devant (combinaison des fenêtres FT3 et FT4) et caractérisons le comportement par un indicateur très fréquemment utilisé dans la littérature sur la conduite automobile : la moyenne arithmétique. (Figure 44)

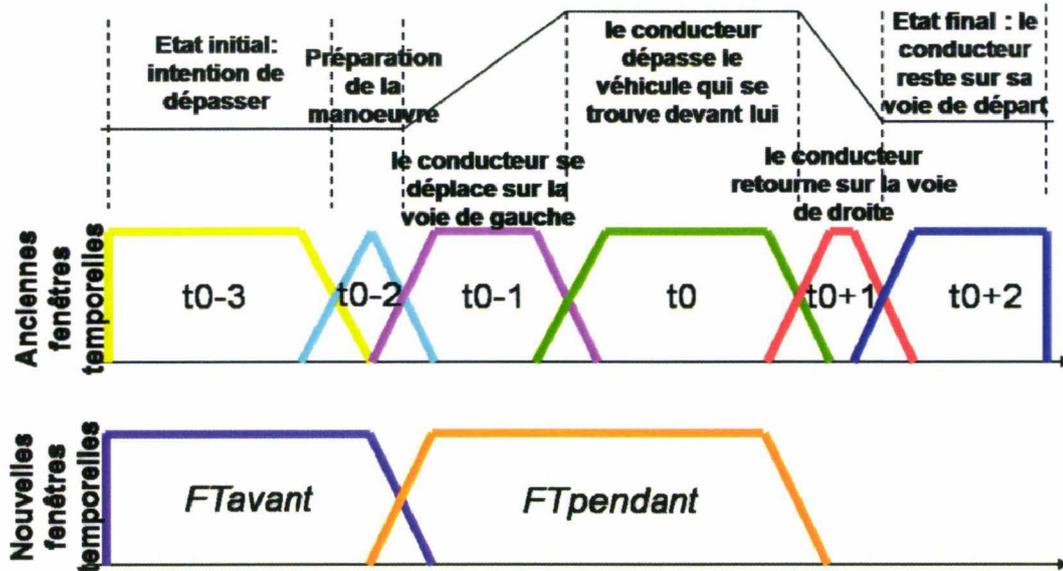


Figure 44 : Nouveau découpage temporel.

Pour chaque triplet (i,j,k) , un nouveau tableau est créé $Y_{3_{ijk}}$ dont chaque ligne r correspond à chaque fenêtre temporelle t ($t=1,2$) et dont chaque colonne c correspond aux valeurs physiques moyennées de chaque variable v ($v=1, \dots, VI=11$, hormis pour la variable clignotant pour laquelle la caractérisation repose sur le calcul de fréquences d'apparition des modalités).

Intéressons-nous au résultat suivant constaté dans l'analyse descriptive MFMV: « il semble exister une différence entre les situations où la vitesse du véhicule qui précède est de 90 km/h et celles où la vitesse du véhicule qui précède est de 110 km/h, notamment en ce qui concerne l'accélération du véhicule ».

Le test devra porter sur la variable *dérivée de la vitesse* sp . Focalisons-nous sur les situations avec un véhicule (VT1), et les 2 modalités de vitesse constante pour le véhicule de devant : 90 et 110.

Deux types de tests peuvent être envisagés : les tests paramétriques comme le test de Student ou les tests non paramétriques comme le test de Wilcoxon. De plus, l'utilisation de tests paramétriques requiert des hypothèses strictes ; par exemple pour le test de Student, il faut que la distribution de la variable testée soit gaussienne, les échantillons soient indépendants, les variances des populations soient égales et enfin que les variables doivent être mesurées dans une échelle de mesure permettant l'utilisation des opérations arithmétiques.

Après l'observation des histogrammes (Annexe : Analyse de *sp*), il apparaît que la variable *sp* ne suit pas la loi de Laplace-Gauss.

Si on considère que 1) la distribution n'est pas gaussienne, 2) les données sont appariées puisque chacun des participants teste les deux situations (90 et 110 km/h) et 3) la variable *sp* est quantitative alors le test de Wilcoxon peut être envisagé [Saporta, 2006].

Ce test étant choisi l'étape de codage revient à un tri par ordre croissant des 34 différences individuelles entre 90 et 110 km/h.

Le test indique qu'il existe une différence significative pour la variable *sp* entre 90 et 110 km/h lors de la fenêtre *FTavant* mais aussi lors de la fenêtre *FTpendant* (Annexe : Analyse de *sp*). Ce test confirme les résultats issus de l'analyse descriptive.

3 Perspectives de travail

Après cette synthèse qui vient d'être faite, il est intéressant de se poser la question de ce qu'il serait possible de faire pour aller plus loin aussi bien dans le cadre de la conduite automobile que dans le plan statistique.

Dans l'étude qui a été menée, les variables sont des positions, vitesses et accélérations. Si ces variables traduisent le « comportement de conduite », ce dernier étant la conjonction d'actions sur les organes de commande (pédales et volant) et sur les clignotants, il serait intéressant d'essayer d'appréhender, dans le cadre du dépassement, l'aspect intentionnel, c'est-à-dire avoir des indices sur la volonté de dépasser dans une optique de construire un modèle des intentions du conducteur et à plus long terme l'implémenter dans un système d'aide. Ce système aurait l'avantage de détecter les intentions du conducteur liées au dépassement et de l'aider uniquement s'il a l'intention de dépasser, contrairement aux systèmes d'aide au dépassement qui existent actuellement (pour plus de détails se référer au chapitre 1). Tout d'abord, il faut définir la relation entre intention et action. Pour cela, [Rajaonah *et al.*, en soumission] a choisi le point de vue de [Pacherie, 2000, 2006] qui a révisé l'approche classique de la théorie de l'action. Son point de vue est intéressant car il permet d'expliquer divers aspects de l'action physique allant de sa planification à son exécution. Intégrant les travaux de divers auteurs ([Brand, 1984], [Bratman, 1987], [Davidson, 1980], [Mele, 1992], [Searle, 1983]), [Pacherie, 2000, 2006] reconnaît les fonctions suivantes aux intentions :

- conclusion du raisonnement pratique (conscient ou inconscient) visant à décider des fins à poursuivre ;
- déclenchement d'un raisonnement pratique visant à décider des moyens à mettre en œuvre pour parvenir aux fins ;
- coordination dans le temps des activités de l'agent entre elles et avec celles d'autres agents ;
- déclenchement de l'action ;
- guidage de l'action, c'est-à-dire mettre en œuvre les étapes successives de l'action ;
- contrôle (*monitoring*) de l'action.

Les fonctions des intentions évoluent donc dans un cadre temporel allant de la période où elles sont formées à l'achèvement de l'action. Pour rendre compte de cette dynamique, l'approche « révisée » recourt à deux niveaux d'explication. Par exemple, [Searle, 1983] distingue « intention préalable » et « intention en action ». [Pacherie, 2000, 2006] estime que cette caractérisation de l'intention en action reste cependant superficielle. S'inspirant des travaux issus du domaine de la neurophysiologie de l'action (par exemple [Jeannerod, 1999]), elle rajoute aux deux niveaux d'explication précédents un troisième niveau, celui des « intentions motrices ». L'intention préalable, de contenu descriptif qui serait conscient, a pour fonction de formuler un type d'action globale, un plan schématique de comment réaliser cette action, et les conditions déclenchant cette action. Elle n'est pas réductible à un complexe de désirs et de croyances, ces derniers étant en amont de l'intention préalable. L'intention en action déclenche l'action et particularise le plan hérité de l'intention préalable au fur et à mesure que l'action s'accomplit. Elle guide et contrôle l'exécution de l'action. L'intention motrice, basée sur les représentations motrices, guide et contrôle plus finement le mouvement physique. Ces trois types d'intentions sont liés par le fait que chacune hérite son but de l'intention qui la précède.

Une des façons de déterminer l'intention du conducteur est d'obtenir des données concernant les « coups d'œil » dans les rétroviseurs [Salvucci et Liu, 2002]. L'idée de base serait alors de pouvoir mettre, en face des données de position (et dérivées) utilisées dans cette thèse, les positions oculaires. Le problème est que les mouvements oculaires ne peuvent

pas être utilisés tels quels (comme les signaux relatifs à la position, absolue ou relative, de la voiture). En effet, si les images que nous avons conscience de percevoir sont stables et ne présentent pas de discontinuité, l'observation des signaux donnant la position oculaire dans l'orbite révèle des changements brusques (de 2 à 5 fois par seconde), d'amplitude très variable (entre 4 et 30°) et rapides (jusque 600°/s) [Levy-Schoen, 1969]. En fait, si on utilise un système de mesure ad hoc, comme un oculomètre [Duchowski, 2007], il faut dégager les entités de mouvements oculaires durant lesquelles l'information est essentiellement perçue. Une analyse bibliographique [Levy-Schoen, 1969] montre alors que cette entité correspond à la notion de « fixation oculaire » (de durée de l'ordre de 100ms), entre lesquelles interviennent des « saccades oculaires ». En conservant les notations suggérées dans le chapitre II, la procédure d'analyse pourrait alors être la suivante :

1) L'ensemble initial des variables devient l'union de deux ensembles où le premier ensemble correspond aux données considérées dans le chapitre IV de cette thèse et le second, aux données oculaires (souvent un signal multidimensionnel à 50 Hz ou 60 Hz dont les composantes donnent les positions horizontale et verticale du regard par rapport à la scène).

2) Le premier ensemble est caractérisé selon la procédure générique donnée dans le II, c'est-à-dire via des valeurs d'appartenance moyennes à des fenêtres spatio-temporelles. Le second ensemble peut être alors caractérisé comme suit :

- Au centre de gravité de chaque fixation oculaire est affecté un ensemble de valeurs d'appartenance à des Fenêtres Spatiales (FS), ces fenêtres étant des zones bidimensionnelles de l'image avec, par exemple, une zone pour le rétroviseur latéral, une pour le rétroviseur intérieur, une pour le tableau de bord, etc. Bien entendu, compte tenu de l'incertitude du système de mesure, des fonctions d'appartenance bidimensionnelles floues peuvent être définies [Loslever *et al.*, 2008]
- A chaque fixation oculaire est affecté un ensemble de valeurs d'appartenance à des Fenêtres Spatiales (FT). En effet, une fixation ayant une durée donnée, elle peut tomber à cheval sur deux FT consécutives. On peut donc, là aussi, considérer des valeurs d'appartenance floues, la valeur d'appartenance étant donnée, par exemple, par la durée relative dans la FT considérée. Notons que, dans le but d'identifier l'intention de dépassement, on peut élargir la première des 7 FT ;

3) A l'instar de ce qui a été fait dans le chapitre IV, un tableau dont les lignes correspondent aux FT des individus pour les différentes situations de conduite du plan d'expérience et les colonnes aux fenêtres spatiales des deux ensembles de variables peut être construit. Ce tableau peut alors être soumis à l'ACM et les résultats apparus comme les plus marquants (influences des facteurs sur les variables et relations entre les variables) pourraient finalement faire l'objet d'une étude spécifique dans un contexte inférentiel.

Notons qu'il serait également intéressant de reconsidérer les données physiologiques présentées dans le III (activité électrodermale, fréquence cardiaque et fréquence respiratoire) et abandonnées car les procédures de mesure n'ont pas été correctement exécutées. Ceci aboutira à considérer un troisième ensemble qui pourrait être abordé par la même approche que les deux autres (caractérisation via des valeurs d'appartenance moyenne à des fenêtres spatio-temporelles, ACM, puis tests d'hypothèses). L'ensemble de la procédure est résumé dans la figure 45.

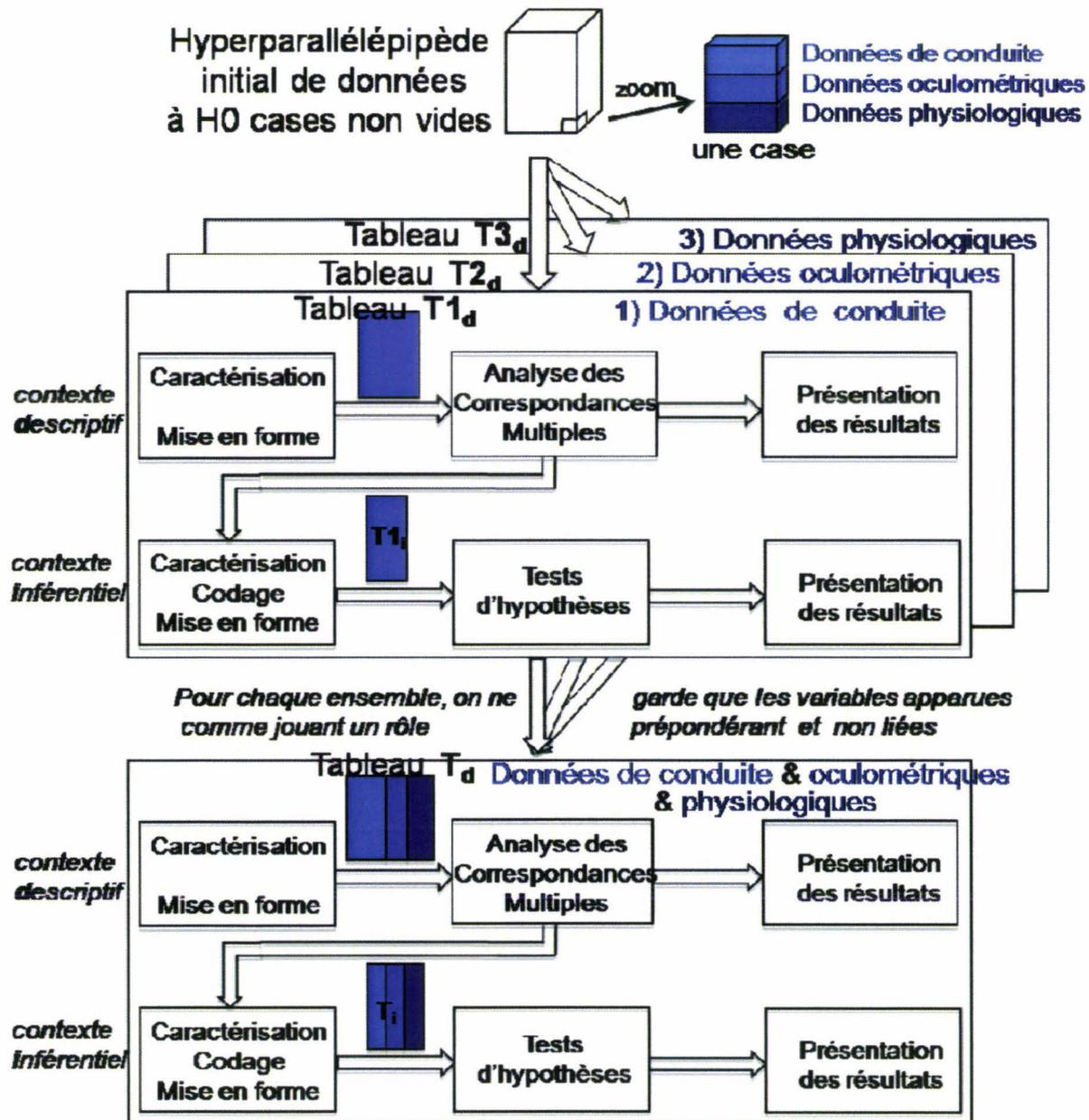


Figure 45 : Résumé de la procédure d'analyse avec des données relatives aux actions sur les organes de commande, des données oculaires et des données physiologiques (les tableaux utilisés dans l'analyse descriptive, avec un « d » en indice, ont des colonnes correspondant à des fenêtres spatiales des variables temporelles, alors que les tableaux utilisés dans l'analyse inférentielle, avec un « i » en indice, ont des colonnes correspondant aux variables temporelles).

La population recrutée lors des expérimentations a été constituée d'hommes entre 20 et 30 ans, étudiants en école d'ingénieur ou en doctorat venant de toute la France. Nos résultats ne nous permettent pas de conclure sur l'ensemble de la population française puisque l'échantillon n'est pas représentatif de cette population. Par contre, cela nous a permis de ne pas nous poser de questions lors de l'analyse concernant les différences hommes-femmes,

jeunes-âgés...Une quarantaine de personnes ont accepté de participer à l'expérimentation, ce qui paraît un peu faible mais compte tenu de la durée d'une passation, il est difficile de faire appel à plus de sujets dans le cadre d'un travail de thèse. Lors de chaque passation, il y avait en permanence 4 expérimentateurs pour pouvoir assurer la mise en place des équipements physiologiques, la gestion du simulateur de conduite, la phase d'auto-confrontation et l'accueil et le suivi du participant. En général, cette équipe était constituée d'un ingénieur d'études, un ingénieur de recherche, un doctorant et un psychologue. Comme les expérimentations ont duré un peu plus d'un mois, certaines personnes ont dû être remplacées pour quelques passations à cause d'autres obligations professionnelles (séminaire, journée de formation, enseignement...). Ce qui a pu causer un biais au niveau du déroulement de la passation ou de la façon de faire notamment pour la pose des électrodes.

Pour finir, les perspectives concernant l'aspect statistique, mentionnons qu'une analyse intéressante à mettre en œuvre concernerait la mise en relation des données temporelles présentées figure 45 avec les questionnaires. Là aussi, un découpage spatial puis l'ACM pourraient être utilisés [Dubart, 2009]. Concernant maintenant la phase de recueil de données, il serait intéressant d'entreprendre des expérimentations sur route réelle pour pouvoir confronter les données provenant du simulateur et celles recueillies sur route réelle.

4 Conclusion

Ce chapitre nous a tout d'abord permis de faire un bilan sur les travaux qui ont été faits tout au long de ce mémoire. Nous avons rappelé les objectifs de l'étude et la méthode utilisée pour répondre à cet objectif ainsi que l'expérimentation réalisée. Une synthèse des résultats a été également faite. Ces résultats donnent quelques éléments sur le comportement du conducteur, mais ne permettraient pas à eux seuls d'alimenter un système d'aide. C'est pour cela qu'il serait intéressant d'étoffer notre base de données à l'aide par exemple des données oculaires, perspectives discutées dans la seconde partie de ce chapitre.

Conclusion générale

Durant ces un peu plus de trois ans de thèse, j'ai pu prendre toute la mesure des difficultés inhérentes à l'analyse expérimentale d'un système en composante humaine. En effet, deux constatations primordiales sont à faire.

L'une d'elles concerne la difficulté inhérente à la phase de collecte de données. Il est bien sûr indéniable qu'un dispositif expérimental comme un simulateur dynamique de conduite requiert un haut niveau de technicité, que ce soit sur le plan mécanique (6 degrés de liberté déplaçant une 206), automatique (asservissement de position des axes) ou informatique (gestion en temps réel de la base de données graphiques et des signaux). Ceci étant, le déroulement d'une expérience est loin d'être entièrement « automatisable ». Il faut plus d'une personne « pour la faire tourner », en l'occurrence quatre dans notre cas : un ingénieur d'étude et de recherche pour s'occuper de la plate-forme (lancement des circuits, vérification de l'enregistrement des signaux...), un thésard pour l'accueil du participant, les questionnaires et la pose des équipements physiologiques et une psychologue pour la phase d'auto-confrontation! En outre, le recueil de données spécifiques (notamment de type physiologique) peut aussi nécessiter des moyens en personnel qualifié. Ceci montre la part importante de personnes à mobiliser pour mener à bien une expérience portant sur un échantillon, ne serait ce que de 40 sujets! Je souhaiterais donc, une fois de plus, remercier tous ceux, les « expérimentateurs » comme les « sujets », qui ont pris part à l'étude présentée dans cette thèse.

L'autre constatation est relative à la phase d'exploitation des données. En effet, j'ai pris conscience de l'existence d'énormes différences intra et inter-individuelles. A ce propos, je souhaiterais faire la remarque suivante. Dans le cadre de mon enseignement en automatique en tant que monitrice puis ATER pour cette année, 3 maquettes (donc 3 « individus ») étaient utilisées en parallèle (en l'occurrence des asservissements de position). J'ai alors pu constater que les différences de comportement d'un jour à l'autre d'une maquette donnée (variabilité intra) et d'une maquette à l'autre (variabilité inter) sont bien moins grandes que celles en présence d'un système à composante humaine, sachant que les maquettes avaient plus de 15 ans et que les étudiants sont loin d'avoir des comportements « sages » avec ces maquettes (notamment un point de résonance était à atteindre pour l'identification).

Ces deux constatations mettent bien en exergue les différences entre l'Automatique où la composante humaine est présente vs. absente dans le système étudié. Ceci étant, si maintenant on distingue *Automatique théorique* (étude mathématique des conditions de stabilité, commandabilité, ... qui m'a été dispensée durant mon cursus d'étudiante) et *Automatique appliquée*, c'est-à-dire celle où le chercheur se trouve face à un système concret, qu'il soit de nature humaine ou non, la démarche dans le second contexte « appliqué » est bien la même : une fois les objectifs fixés, mettre en place des dispositifs de mesure et une organisation spatio-temporelle de recueil des données (plan d'expérience et protocole expérimental), collecter puis analyser des données pour arriver à des modèles. Certes, ici, de part la présence des aspects MultiFactoriels et MultiVariés (MFMV), l'analyse a été essentiellement qualitative. De même, ici, les résultats fournis ont plutôt été des modèles de types graphique (plans principaux issus de l'ACM, notamment) et verbal (commentaires relatifs aux sorties de l'ACM ainsi que les conclusions aux tests d'hypothèse), par rapport aux modèles de type mathématiques souvent rencontrés en Automatique (fonction de transfert, représentation d'état, ...).

Ceci étant, les deux difficultés évoquées plus haut sont à contrebalancer par ce que cette thèse sur un système à composante humaine m'a apportée.

En effet, en ce qui concerne la Statistique, même si ces notions sont abordées en école d'ingénieur, il existe une très grosse différence entre les « cas d'école » et notre base de données. Premièrement, le nombre de grandeurs – variables et facteurs – est beaucoup plus important. Deuxièmement, les cas d'école ont recours à des jeux de données où l'interprétation des plans factoriels et des tableaux va se faire facilement et sans ambiguïté, ce qui n'a pas été notre cas ici. De plus, la phase de caractérisation des données est une phase très longue et délicate et fait intervenir plusieurs disciplines, par exemple, le traitement du signal pour filtrer et rééchantillonner les signaux ou encore la prise en compte de l'être humain pour donner par exemple un sens physique à un découpage spatial.

J'ai également pu approfondir mes connaissances dans le domaine de l'Informatique notamment pour le développement de programmes sous Matlab. En effet, pour passer des fichiers du simulateur au fichier de l'analyse ou également pour tous les pré-traitements (codage flou, découpage spatio-temporel...), un programme adapté à nos besoins était nécessaire.

Concernant la prise en compte du facteur humain, je dirai que travailler avec des personnes de ce domaine, c'est-à-dire de la psychologie et de la physiologie, m'a fait découvrir d'autres aspects et d'autres façons de faire pour analyser une telle base de données. J'ai bénéficié de leur recul sur l'être humain pour la conception de questionnaires nécessaires à l'expérimentation mais aussi pour l'interprétation des résultats, recul qu'en tant qu'automaticien nous n'avons pas.

Le Gantt présenté à la figure 46 résume mes trois années de thèse. Si j'avais dû faire tout ce travail toute seule, j'aurais passé largement plus de trois ans. Tout d'abord, lorsque je suis arrivée, le plan d'expérience était déjà monté, la construction des scénarii sur le simulateur de conduite et l'aspect technique ont été pris en charge par deux ingénieurs du laboratoire. Puis, lorsque l'expérimentation fait intervenir l'être humain, on ne maîtrise pas la durée, premièrement d'une passation qui est différente d'un sujet à l'autre et, deuxièmement, de la campagne expérimentale puisque certains participants sont écartés à cause de leurs comportements (pas de maîtrise du simulateur, stress, mal du simulateur...) et pour ne pas les vexer, nous les laissons finir. Bien entendu, il faut trouver de nouveaux sujets et recommencer une passation, ce qui rallonge la campagne d'une journée à chaque fois. Pour finir, il ne faut pas oublier qu'un des devoirs d'un chercheur est de publier, cet exercice a pris beaucoup de temps notamment pour la rédaction des revues internationales.

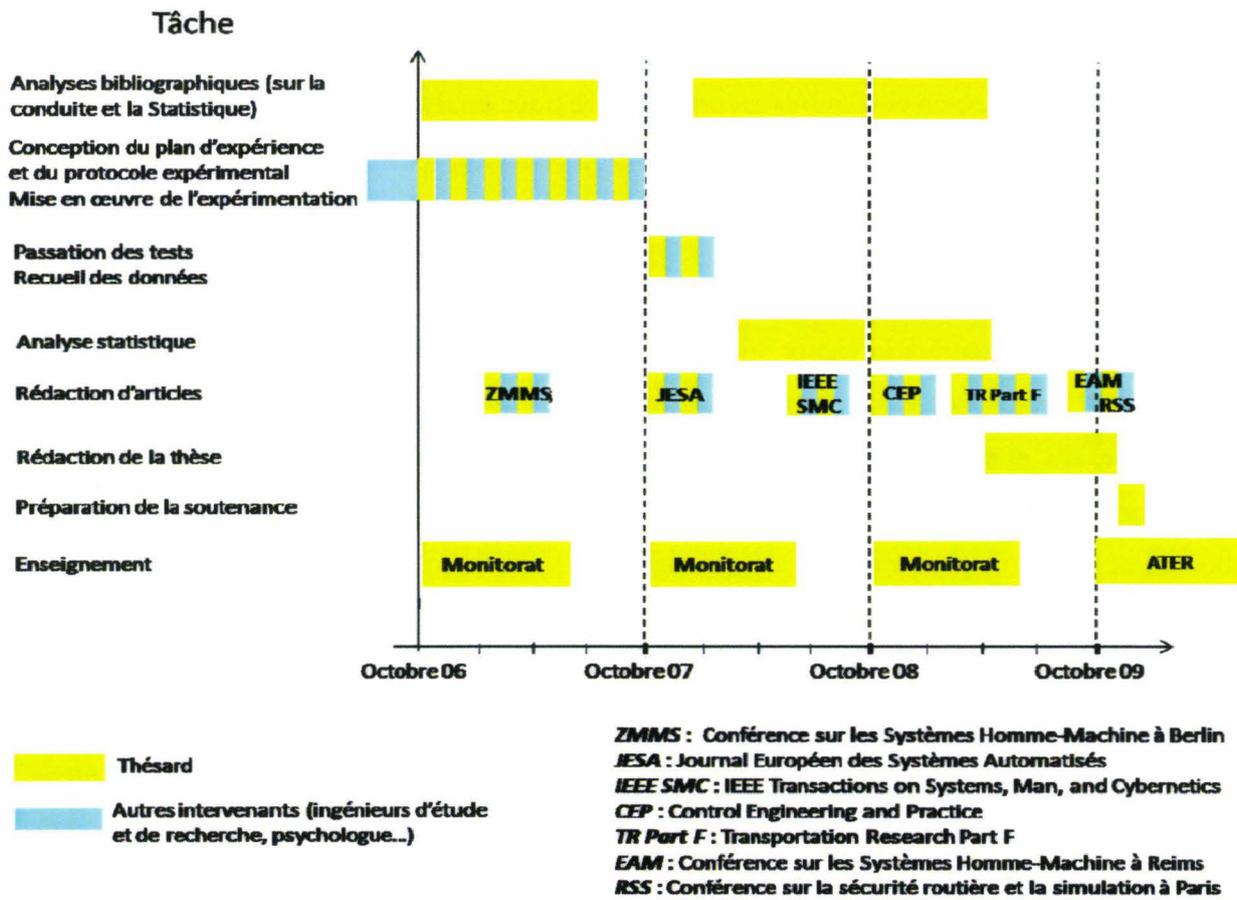


Figure 46 : Gantt de mon activité durant la thèse et de ceux/celles impliquées dans la thèse.

En résumé, tout ce travail m'a permis d'acquérir de l'expérience dans plusieurs domaines, et encore plus dans le domaine des facteurs humains puisqu'il m'était totalement inconnu.

Publications

Reuves internationales avec comité de lecture

Younsi K., Loslever P., Popieul J.C. et Simon P. Using space-time fuzzy windowing for a preliminary descriptive analysis. An example with overtaking in car-driver-environment systems. Soumis à *IEEE SMC Systems Man and Cybernetics*. 2009.

Younsi K., Loslever P., Popieul J.C. et Simon P. Study of multidimensional signals from human control behavior experiments. Principle and example with multiple correspondence analysis. Soumis à *Control Engineering Practice*. 2009.

Rajaonah B., Younsi K., Popieul J.C. et Rousseau F. Driver intentions : A driving simulator study of overtaking on a motorway. En soumission à *Transportation Research Part F*. 2009.

Revue nationale avec comité de lecture

Girard J.M., Younsi K., Loslever P., Popieul J.C. et Simon P. Etude du système conducteur-véhicule-environnement sur simulateur avec perturbation de la tâche de conduite. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. Volume 43. Pages 263-294. 2009.

Conférences internationales

Younsi K., Floris J., Rajaonah B., Simon P., Loslever P. et Popieul J.C. Study of driver's behaviour during lane change situations. *International Conference Road Safety and Simulation (RSS)*. 2009.

Younsi K., Simon P., Loslever P., Floris J. et J.C. Popieul. Using time windowing and singular value decomposition for the analysis of multidimensional signals. Example using PCA with driving data. *European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control (EAM)*. 2009.

Younsi K., Rajaonah B., Floris J., Simon P. et Popieul J.C. Identification of driver's lane change intention on motorway by pattern matching method. *7th Berlin Workshop on Human Machine Systems*. 2007.

Bibliographie

- Adell E and Varhelyi A. Driver comprehension and acceptance of the active accelerator pedal after long-term use. *Transportation research Part F*. Volume 11. Pages 37-51. 2008.
- Ahlm K., Björnstig U. and Öström M. Alcohol and drugs in fatally injured motor vehicle drivers in northern Sweden. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 41. Pages 129-136. 2008.
- Allen TM., Lunenfeld H., Alexander GJ. Driver information needs. *HRB*. Volume 366. Pages 102-115. 1971.
- Bao S. and Boyle L. Age-related differences in visual scanning at median-divided highway intersections in rural areas. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 41. Pages 146-152. 2008.
- Badr Y. Influence de l'environnement routier sur le comportement des conducteurs, une contribution à la compréhension des déterminants du comportement des conducteurs : étude des facteurs influençant les vitesses pratiquées dans le cas de traversée de petites agglomérations, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991.
- Bellanger M. Traitement numérique du signal. 8ème édition. Paris: Dunod. 2006.
- Benzecri J.P. Pratique de l'analyse des données. Tome 1. Paris: Bordas. 1984.
- Benzecri J.P. Correspondence analysis handbook. CRC Press. 1992.
- Bertin J. La graphique et le traitement graphique de l'information. Edition Flammarion. 1977.
- Boughettaya A. and Le Viet Q. Data clustering analysis in a multidimensionnal space. *Information Sciences*. Pages 267-295. 1998.
- Bouslimi W. Modélisation du comportement du conducteur dans les situations d'urgence, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- Brand M. Intending and action. Cambridge, MA: MIT Press. 1984.
- Bratman M.E. Intention, plans, and practical reason. Cambridge, MA: Cambridge University Press. 1987.
- Brissart G. Etude du comportement du conducteur en régulation longitudinale sur route pour la spécification de systèmes de sécurité active, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2004.

-
- Clarke D.D., Ward P.J. and Jones J. Overtaking road-accidents : Differences in manoeuvre as a function of driver age. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 30. Pages 455-467. 1998.
- Davidson D. Essays on actions and events. Oxford: Oxford University Press. 1980.
- Deffenbacher J.L., Lynch R.S., Oetting E.R. and Swaim R.C. The driving anger expression inventory: A measure of how people express their anger on the road. *Behaviour Research and Therapy*. Volume 40. Pages 717-737. 2002.
- Dubart D. Méthodologie d'exploitation de données non-temporelles et temporelles issues d'une étude sur le système Conducteur-Véhicule-Environnement (SCVE) : Application à la situation de suivi, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.
- Duchowski A.T. Eye Tracking Methodology – Theory and Practice. New-York : Springer. 2007.
- Evans L. and Gerrish P.H. Antilock brakes and risk of front and rear impact in two-vehicle crashes. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 28. Pages 315-323. 1996.
- Falissard B. Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vie. Paris : Masson. 1998.
- Ferlazzo F., Fagioli S., Di Nocera F. and Sdoia S. Shifting attention across near and far spaces: Implications for the use of hands-free cell phones while driving. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 1859-1864. 2008.
- Fredette M., Mambu L., Chouinard A. and Bellavance F. Safety impacts due to the incompatibility of SUVs, minivans, and pickup trucks in two-vehicle collisions. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 1987-1995. 2008.
- Fuller R. A conceptualization of driving behavior as threat avoidance. *Ergonomics*. Volume 27. Pages 1139-1155. 1984.
- Georgin J.P. Analyse interactive des données (ACP, AFC) avec Excel. Presses Universitaires de Rennes. 2007.
- Georgin J.P. et Gouet M. Statistiques avec Excel. Presses Universitaires de Rennes. 2005.
- Gibson J.J., Crooks L.E. A theoretical field analysis of automobile driving. *The American Journal of Psychology*. Volume L I. Pages 453-471. 1938.
- Gillian D.J., Wickens C.D., Hollands J.G. and Carswell C.M. Guidelines for presenting quantitative data in HFES publications. *Human Factors*. Pages 28-41. 1998.
- Girard J.M. Contribution à l'évaluation de la charge de travail du conducteur automobile : une approche exploratoire multivariée, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2007.
-

- Hatfield J. and Fernandes R. The rôle of risk-propensity in the risky driving of younger drivers. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 41. Pages 25-35. 2008.
- Hegeman G., Brookhuis K. and Hoogendoorn S. Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking. *EJTIR*. Volume 5. Pages 281-296. 2005.
- Horrey W.J. and Lesch M.F. Driver-initiated distractions: Examining strategic adaptation for in-vehicle task initiation. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 41. Pages 115-122. 2008.
- Jeannerod M. The 25th Bartlett lecture. To act or not to act: perspectives on the representation of action. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Pages 1-29. 1999.
- Johnson R.A. and Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. New Jersey: Prentice-Hall. 1992.
- Kiefer R.J. and Hankey J.M. Lane change behavior with a side blind zone alert system. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 683-690. 2008.
- Kiefer R.J., Leblanc D.J. and Flannagan C.A. Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers' last-second braking and steering judgements. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 37. Pages 295-303. 2005.
- Kilpeläinen M. and Summala H. Effects of weather and weather forecasts on driver behaviour. *Transportation research Part F*. Volume 10. Pages 288-299. 2006.
- Kuge N., Yamamura T., Shimoyama O. and Liu A. A driver behavior recognition method based on a driver model framework. http://www.mit.edu/~amliu/Papers/SAE2000_Kuge.pdf. 1998.
- Lebart L., Morineau A. et Fénelon J.P. Traitement des données statistiques. Paris: Bordas. 1982.
- Lebart L., Morineau A. et Piron M. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Paris: Dunod. 1995.
- Lebart L., Morineau A. et Piron M. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Paris: Dunod. 2000.
- Leung S. and Starmer G.. Gap acceptance and risk-taking by young and mature drivers, both sober and alcohol-intoxicated, in a simulated driving task. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 37. Pages 1056-1065. 2005.
- Levy-Schoen A. L'étude des mouvements oculaires – Revue des techniques et des connaissances. Paris : Dunod. 1969.
- Loslever P. Les chemins de l'analyse statistique de données temporelles. I. Etapes et évaluation. *JESA*. 2000.

- Loslever P. Obtaining information from time data statistical analysis in human component system studies. I. Methods and performances. *Information Sciences*. Pages 133-156. 2001.
- Loslever P. Organisation, caractérisation et analyse multidimensionnelle des données de la marche : aspects méthodologiques. *ITBM-RBM*. Pages 137-148. 2002.
- Loslever P., Cloup P., Bouilland S. and Lepoutre F.X. Mariage d'un système vidéo-informatique -SAGA3- et d'une méthode statistique exploratoire multidimensionnelle -ACM- pour l'étude de données gestuelles. II. Exemples avec le lever de charge, la marche et la posture assise. *ITBM-RBM*. Pages 95-106. 2004.
- Loslever P., Guerra T.M., Bouilland S. and Ouattara S. L'étape de caractérisation pour l'analyse de données temporelles. I. Principe et évaluation. *APII-JESA*. 1997.
- Loslever P., Simon P., Rousseau F. and Popieul J.C. Using space windowing for a preliminary analysis of complex time data in human component system studies. Examples with eye-tracking in advertising and car/head movements in driving. *Information Sciences*. Volume 178. Pages 3645-3664. 2008.
- Mc Gee V.E. Principles of Statistics, Traditionnal and Bayesian. New-York: Meredith-Corporation. 1971.
- Mele A.R. Springs of actions. Oxford : Oxford University Press. 1992.
- Michon J.A. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In Evans L. and Schwing R.C., editors, *Human behavior and traffic safety*, 485-524, Plenum Press, New York, NY. 1985.
- Minderhoud M.M. and Bovy P.H.L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 33. Pages 89-97. 2001.
- Nigro J.M., Lorient-Rougegrez S. and Rombaut M. Driving situation recognition with uncertainty management and rule-based systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Volume 15. Pages 217-228. 2002.
- ONISR. La sécurité routière en France. Bilan de l'année 2005. Paris : La documentation française. 2006. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/074000050/index.shtml>
- Pacherie E. The content of intentions. *Mind and Language*. 2000.
- Pacherie E. Towards a dynamic theory of intentions. In S. Pockett, W.P. Banks & S. Gallagher (eds) *Does Consciousness Cause Behavior? An Investigation of the Nature of Volition*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 145-167. 2006.
- Pandit S.M. and Wu S. Time Series and System Analysis with Applications. Florida: Krieger Publishing company. 1993.

- Pentland A. and Liu A. Modeling and prediction of human behavior. Letter communicated by Dean Pomerleau. http://www.mit.edu/~amliu/Papers/PentlandLiu_NeuralComp99_v11n2.pdf. 1998.
- Perron T. Méthodologie d'analyse de sécurité primaire automobile pour la spécification fonctionnelle et l'évaluation prévisionnelle d'efficacité de systèmes d'évitement d'accidents, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 1997.
- Rakauskas M.E., Gugerty L.J., Ward N.J. Effets of naturalistic cell phone conversations on driving performance. *Journal of Safety Research*. Volume 35. Pages 453-464. 2004.
- Rasmussen J. Skills, rules and knowledge, signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*. Volume 13. Pages 257-266. 1983.
- Richer I. and Bergeron J. Driving under the influence of cannabis: Links with dangerous driving, psychological predictors, and accident involvement. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 41. Pages 299-307. 2008.
- Rajaonah B., Younsi K., Popieul J.C., Rousseau F. Driver intentions : A driving simulator study of overtaking on a motorway. Soumis à *Transportation Research Part F*.
- Riera B. Méthodologie d'évaluation des interfaces Homme/véhicule automobile, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 1993.
- Rosey F., Auberlet J.M., Bertrand J. and Plainchault P. Impact of perceptual treatments on lateral control during driving on crest vertical curves: a driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 1513-1523. 2008.
- Salvucci D.D. and Liu A. The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior. *Transportation research Part F*. Volume 5. Pages 123-132. 2002.
- Saporta G. Probabilités, analyse des données et statistique. Editions Technip. 2006.
- Sato T. and Akamatsu M. Influence of traffic conditions on driver behavior before making a right turn at an intersection : Analysis of driver behavior based on measured data on actual road. *Transportation research Part F*. Volume 10. Pages 397-413. 2007.
- Scully J. and Newstead S. Evaluation of electronic stability control effectiveness in Australasia. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 2050-2057. 2008.
- Searle J. Intentionality. Cambridge : Cambridge University Press. 1983.
- Simsekoglu O and Lajunen T. Relationship of seat belt use to health and driver behaviors. *Transportation research Part F*. Volume 12. Pages 235-241. 2008.
- Sivak M., Schoettle B., Reed M.P. and Flannagan M.J. Influence of visibility out of the vehicle cabin on lane-change crashes. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 38. Pages 969-972. 2006.

-
- Sprenst P. Applied Non parametric Statistical Methods. London: Chapman & Hall. 1989.
- Stephens A.N. and Groeger J.A. Situational specificity of trait influences on drivers' evaluations and driving behaviour. *Transportation research Part F*. Volume 12. Pages 29-39. 2008.
- Stevens G. Scaling : a sourcebook for behavioral scientists. Chicago: Aldine Publishing and co. 1974.
- Sullman M.J. Anger amongst New Zealand drivers. *Transportation Research Part F*. Volume 9. Pages 173-184. 2006.
- Tang T.Q., Huang H.J., Wong S.C. and Xu X.Y. A new overtaking model and numerical tests. *Physica A*. Volume 376. Pages 649-657. 2007.
- Terry H.R., Charlton S.G. and Perrone J.A. The role of looming and attention capture in drivers' braking responses. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 1375-1382. 2008.
- Tricot N. Détection et diagnostic des évolutions du comportement du conducteur. Application à la sécurité Active, Rapport de DEA, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.
- Tricot N. Conception et évaluation de systèmes coopératifs avancés d'aide à la conduite automobile, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2005.
- Todoskoff A. Etude des évolutions temporelles du comportement du conducteur sur autoroute: Analyse multidimensionnelle de signaux relatifs au véhicule et aux mouvements de tête sur simulateur, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1999.
- Tufte E.R. The visual display of information. Cheshire: Graphics Press. 1983.
- Van der Molen H.H., Botticher M.T. Risk models for traffic participants : a concerted effort for theoretical operationalizations. In JA Rothengatter and RA. De Bruin editors. Road users and traffic safety, Van Gorcum, Assen. 1987.
- Van Winsum W., De Waard D. and Brookhuis K.A. Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation research Part F*. Volume 2. Pages 139-149. 1999.
- Vashitz G., Shinar D. and Blum Y. In-vehicle information systems to improve traffic safety in road tunnels. *Transportation research Part F*. Volume 11. Pages 61-74. 2008.
- Vigier M.G. Pratique de la maîtrise statistiques des procédés. Paris : Les éditions d'organisation. 1989.
- Vogel K. A comparison of headway and time to collision as safety indicators. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 35. Pages 427-433. 2003.
-

- Vollrath M., Totzke I. In-vehicle communication and driving: An attempt to overcome their interference. *Rapport NHTSA*, <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-13/driverdistraction/Topics043100033.htm>. 2000.
- Wickens C.D. Engineering psychology and human performance. New York : HarperCollins Publishers. 1992.
- Wilde G.J.S. The theory of risk homeostasis : implications for safety and health. *Risk Analysis*. Volume 2. Pages 209-215. 1982.
- Weller G., Schlag B., Friedel T. and Rammin C. Behaviourally relevant road categorisation : a step towards self-explaining rural roads. *Accident Analysis and Prevention*. Volume 40. Pages 1581-1588. 2008.
- Yan X., Radwan E., Guo D. and Richards S. Impact of “Signal Ahead” pavement marking on driver behavior at signalized intersections. *Transportation research Part F*. Volume 12. Pages 50-67. 2008.

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du nombre de tués en regard de celle de la réglementation de 1970 à 2003 [Bouslimi, 2006].	7
Figure 2 : Sécurité active vs sécurité passive.	8
Figure 3 : Le schéma du SCVE.	9
Figure 4 : Modèle de Wickens. [Wickens, 1992].	11
Figure 5 : Relation entre les facteurs et les variables. [Loslever et al, 1997].	14
Figure 6 : Fréquence des coups d'œil dans les rétroviseurs suivant la classe d'âge et le type de manœuvres. [Bao et Boyle, 2008]	15
Figure 7 : Temps de réaction au stimulus visuel. [Ferlazzo et al, 2008]	20
Figure 8 : Pourcentage d'arrêt au feu par rapport à la distance séparant l'inscription du feu. [Yan et al, 2008].	22
Figure 9 : Temps de détection du véhicule suivant la géométrie de la route. [Leung et Starmer, 2005]	26
Figure 10 : Déroulement d'un déboîtement pour un participant. [Van Winsum et al, 1999].	28
Figure 11 : Dérivée de l'angle au volant en fonction de l'angle au volant lors des changements de voie en urgence (LCE). [Kuge et al, 1998]	32
Figure 12 : Modèle de Hegeman. [Hegeman et al, 2005]	34
Figure 13 : Acquisition progressive de connaissances sur le système étudié à partir d'une approche statistique. [Loslever et al, 1997]	41
Figure 14 : Principe de transformation des données et analyse statistique en vue d'extraire des connaissances.	42
Figure 15 : Une façon de classer les méthodes d'exploitation des données.	46
Figure 16 : Fenêtrage spatial pour la position latérale sur une autoroute à 2*2 voies.	49
Figure 17 : Différentes façons de caractériser les données temporelles.	51
Figure 18 : Mise sous forme de tableaux à deux entrées avec un découpage spatio-temporel et $U = 3$ facteurs.	53
Figure 19 : Exemples de façon d'organiser toutes les données dans H_2 (cf. figure 18), selon des tableaux à 2 entrées : a) tableau contenant toutes les données temporelles, b) tableau où on moyenne sur un facteur (par exemple t), tableau où on moyenne sur 3 facteurs (par exemple i, j et k).	55
Figure 20 : Le simulateur de conduite SHERPA.	62
Figure 21 : Architecture du simulateur de conduite Sherpa.	64
Figure 22 : Rôle des véhicules lors d'une expérimentation.	66
Figure 23 : Position en X, Y, Z, psi, téta et phi de la plateforme	69
Figure 24 : Vidéos recueillies lors d'une expérimentation.	71
Figure 25 : Déroulement d'une passation.	73
Figure 26 : Contenu d'une case de H_0 .	75
Figure 27 : a) Angle au volant. b) Angle au volant après filtrage. c) Angle au volant après rééchantillonnage.	78
Figure 28 : Passage de H_0 à H_1 .	79

Figure 29 : Découpage temporel selon 6 fenêtres trapézoïdales ou triangulaires..... 85

Figure 30 : Deux exemples de positionnement des instants pivots : en haut, cas sans oscillation de la trajectoire ; en bas, cas avec oscillation (un triplet (i,j,k) désigne le conducteur i , le nombre de véhicules j et la modalité des véhicules du trafic k). 87

Figure 31 : Exemples de découpage spatial. a) Dérivée de la vitesse, b) Position latérale et c) Clignotant..... 90

Figure 32 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections des points correspondant aux a) 34 points-colonnes (1 point par fenêtre spatiale) (toutes les modalités d'une même variable sont reliées à l'aide d'un trait plein pour une variable quantitative et d'un trait discontinu pour une variable qualitative), b) 3042 points-lignes (1 point par triplet (i,j,k,t) , i =facteur individu, j =nombre de véhicules dans le trafic, k =modalités des véhicules, t =facteur temps)..... 97

Figure 33 : ACM du tableau ST^*_{jk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 15 points lignes de $ST^*_{j,k}$ (un point-ligne correspond à une situation expérimentale, donc une paire (j,k)) 98

Figure 34 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux lignes du tableau $ST^*_{j,k+t}$ correspondant à $j=1$ (cas avec un seul véhicule). (En bas de la figure est rappelé le fenêtrage temporel ; les codes de couleurs des FT sont les mêmes que ceux de la figure 32). 100

Figure 35 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 34 points lignes de ST^*_i . (un point-ligne correspond au profil moyen de l'individu i) Les sujets en rouge seront étudiés en détail lors de la prochaine étape. 101

Figure 36 : ACM du tableau ST^*_{ijk} pour les axes 1 et 2. Projections en illustratif des points correspondant aux 4 individus 18, 20, 25 et 30 pour les 6 fenêtres temporelles. (chaque trajectoire correspond à la moyenne des 15 situations pour un individu donné)..... 102

Figure 37 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de l'accélération du véhicule et de l'utilisation du clignotant lors des changements de voies. Triplet $(17,1,1)$: Individu 17 lors d'une situation à un seul véhicule roulant à 90 km/h. Triplet $(30,3,8)$: Individu 30 lors d'une situation à trois véhicules avec le véhicule de devant roulant à 90 km/h et celui de derrière gardant une grande interdistance..... 104

Figure 38 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de la variable TP par rapport à sa dérivée tp pour 3 individus ($i=12, 29$ et 26) pour la situation $j=1$ (cas avec un seul véhicule) et $k=1$ (vitesse de $VT1=90\text{km/h}$). a) Triplet $(12,1,1)$. b) Triplet $(29,1,1)$. c) Triplet $(26,1,1)$ 106

Figure 39 : Proposition de représentation graphique pour montrer l'utilisation du clignotant lors des six fenêtres temporelles. 107

Figure 40: Proposition de représentation graphique pour montrer les différences de distribution pour deux situations avec un seul véhicule a) Situation 90. b) Situation 110. 108

Figure 41: Proposition de représentation graphique pour montrer l'évolution de la variable TP par rapport à sa dérivée tp pour l'individu $i=9$ pour la situation $j=1$ (cas avec un seul véhicule). a) $k=1$ (vitesse de $VT1=90\text{km/h}$). b) $k=2$ (vitesse de $VT1=110\text{km/h}$). 110

Figure 42: Proposition de représentation graphique pour montrer quelques profils de conduite différents (individus $i=18, 20, 25$ et 30 situés aux extrémités des axes). 111

Figure 43 : Proposition de représentation graphique pour montrer quelques stratégies utilisées lors des manœuvres de dépassement lors des situations faisant intervenir 3 véhicules où le véhicule de devant roule à 90 km/h et celui de derrière laisse une petite interdistance avec le véhicule sujet..... 113

Figure 44 : Nouveau découpage temporel. 122

Figure 45 : Résumé de la procédure d'analyse avec des données relatives aux actions sur les organes de commande, des données oculaires et des données physiologiques (les tableaux utilisés dans l'analyse descriptive, avec un « d » en indice, ont des colonnes correspondant à des fenêtres spatiales des variables temporelles, alors que les tableaux utilisés dans l'analyse inférentielle, avec un « i » en indice, ont des colonnes correspondant aux variables temporelles). 127

Figure 46 : Gantt de mon activité durant la thèse et de ceux/celles impliquées dans la thèse..... 134

Annexe : Etude des axes 3 et 4

L'étude des axes 3 et 4 montre des phénomènes plus locaux que les axes 1 et 2 (Figure 1). Commençons par étudier le plan des points-modalités. Le coté gauche de l'axe 3 met en correspondance :

- la modalité *pas d'appui* de la position de la pédale d'accélérateur $TP-$, la modalité *décélération* de la dérivée de la vitesse $sp-$ et la modalité *relâchement de la pédale* de la dérivée de la pédale d'accélérateur $tp-$
- la modalité *appui fort* de la position de la pédale d'accélérateur $TP+$, la modalité *accélération* de la dérivée de la vitesse $sp+$ et la modalité *enfoncement de la pédale* de la dérivée de la pédale d'accélérateur $tp+$
- la modalité *grande* de la différence de vitesse avec $VT1 SVh$.

Le coté droit de l'axe 3 met en correspondance :

- la modalité *appui constant* de la position de la pédale d'accélérateur $TP=$, la modalité *pas accélération* de la dérivée de la vitesse $sp=$ et la modalité *pas d'enfoncement de la pédale* de la dérivée de la pédale d'accélérateur $tp=$
- la modalité *petite* de la différence de vitesse avec $VT1 SVl$.

L'axe 4 met en correspondance :

- la modalité *pas d'appui* de la position de la pédale d'accélérateur $TP-$, la modalité *décélération* de la dérivée de la vitesse $sp-$ et la modalité *relâchement de la pédale* de la dérivée de la pédale d'accélérateur $tp-$ (vers le haut de cet axe)
- les trois modalités de la variable SV avec la modalité *grande* SVh en bas de l'axe, la modalité *moyenne* SVm au milieu et la modalité *petite* SVl en haut.

L'association des variables TP , sp et tp semble logique puisqu'elles sont liées par leur signification physique.

Concernant le plan des points-lignes, le centre de gravité du nuage pour chacune des différentes fenêtres temporelles semble centré autour de l'origine des axes avec quelques points dispersés essentiellement sur la gauche de l'axe 3. Pour la fenêtre 4, une grande majorité des points est située vers la droite de l'axe, c'est la seule qui fait apparaître ce phénomène.

Mettons en relation le graphe des points-modalités et des points-individus. La majorité des points-lignes de toutes les fenêtres temporelles peuvent être mis en relation avec l'association des trois modalités $TP=$, $sp=$ et $tp=$. Les points lignes de la fenêtre 4 se situent principalement sur l'extrême droite de l'axe 1 avec quelques points seulement en bas à gauche de cet axe ; ces rares points peuvent donc être mis en relation avec les trois modalités $TP+$, $sp+$ et $tp+$. Concernant les 5 autres fenêtres, quelques points se situent à la gauche de l'axe 1 ; ceux situés vers le haut peuvent être mis en relation avec les modalités : $TP-$, $sp-$ et $tp-$ et ceux situés vers le bas avec $TP+$, $sp+$ et $tp+$. La tendance générale (axes 1 et 2) est que les individus accélèrent pendant la fenêtre 3 et décélèrent pendant la fenêtre 5. L'étude des axes 3 et 4 montre ici que quelques individus ne se comportent pas de la même façon. (Résultat 5).

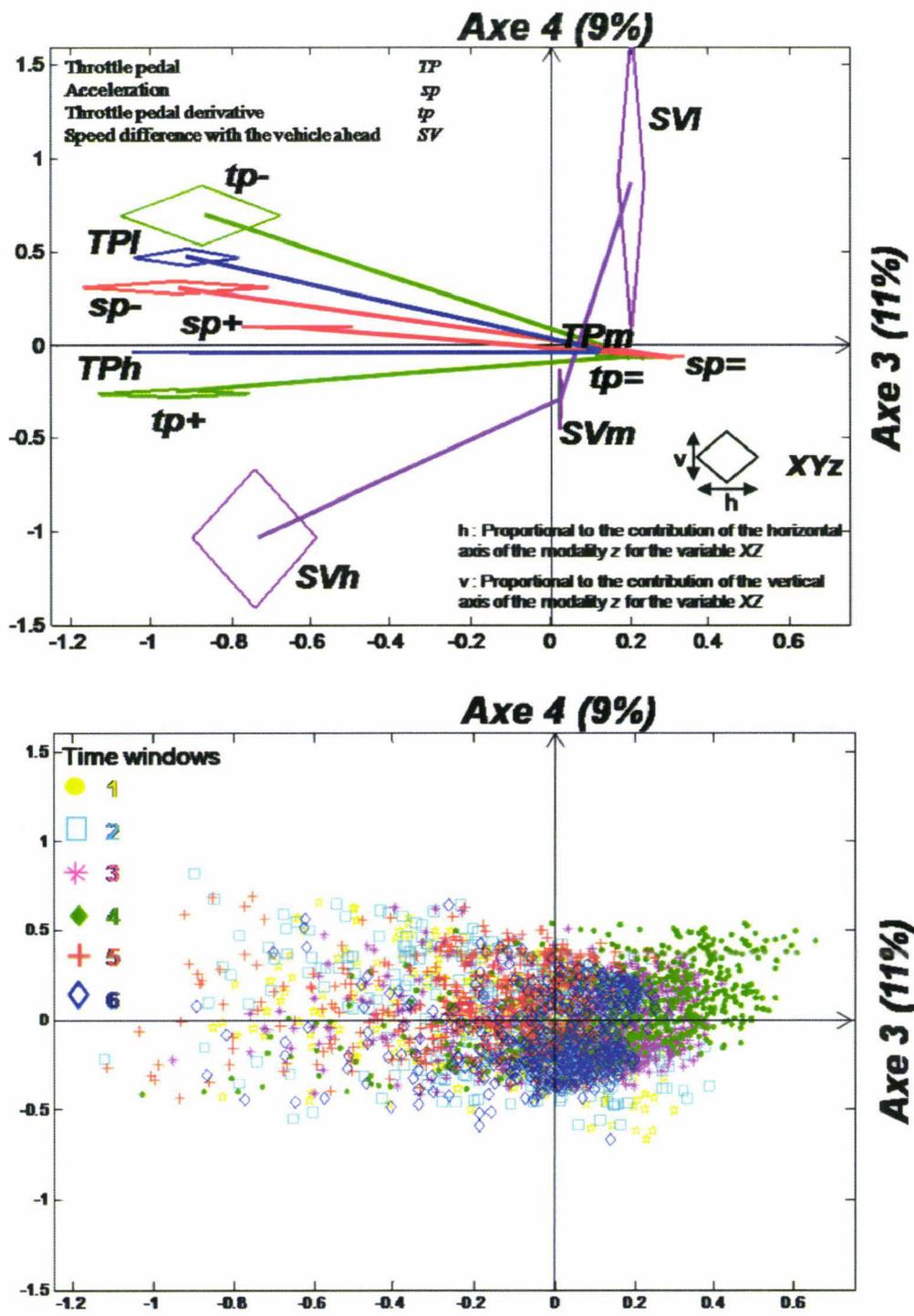


Figure 1 : ACM du tableau ST_{ijk} pour l'axe 3 et 4. a) Points-variables, b) Points-lignes.

Annexe : Analyse de *sp*.

L'histogramme est une façon synthétique d'étudier l'ensemble des valeurs prises par une variable afin de savoir, entre autres, si sa distribution est gaussienne. Notons qu'avec uniquement 34 valeurs individuelles le choix du découpage de la plage de variation est délicat, ceci d'autant plus que l'on va s'intéresser à la construction de 4 histogrammes (90 et 110 km/h pour fenêtre *FTavant* et *FTpendant*). Avec le souci de garder 4 découpages identiques (afin de pouvoir comparer les 4 graphiques de manière aisée), le choix des classes s'est porté à 5 sur les recommandations de [Vigier, 1989].

La figure 1 montre pour la variable *sp* un histogramme pour chaque situation : 90 ou 110 km/h et pour chaque fenêtre *FTavant* et *FTpendant*. D'une manière générale, les individus se situent autour de zéro mis à part pour l'individu 9 lors de la situation 110 km/h pour la fenêtre *FTpendant*. Savoir expliquer son comportement nous permet de vérifier si son positionnement est du à une erreur ou s'il est normal. Dans le chapitre IV, nous avons vu que l'individu 9 accélérât fortement lors des situations à 110. Deux choix s'offrent donc à nous : supprimer cet individu et utiliser un test paramétrique ou le garder et dans ce cas, minimiser son influence en utilisant des tests non-paramétriques (au lieu de garder les valeurs physiques, on considère leurs rangs). Ce deuxième choix sera retenu puisque son comportement est tout à fait normal, même s'il réagit assez différemment par rapport aux autres individus.

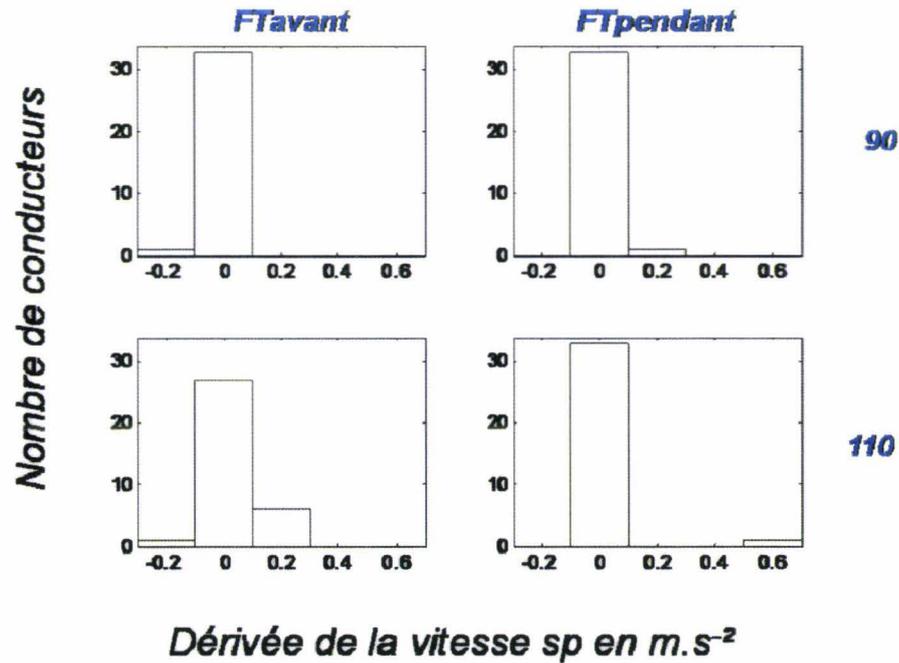


Figure 1: Distribution de la variable sp pour a) situation à 90km/h et b) situation à 110 km/h (calculs faits pour 34 valeurs individuelles et VTI , c'est-à-dire la situation expérimentale avec une seule voiture placée devant le conducteur, celle-ci roulant à 90 ou 110 km/h).

La figure 2 est une façon de représenter la variable sp pour les deux situations : 90 et 110 km/h et les deux fenêtres : FT_{avant} et $FT_{pendant}$. Les valeurs se situent globalement dans l'intervalle $[-0.25 ; 0.25]$ mis à part pour la situation à 110 lors de la fenêtre $FT_{pendant}$ où le maximum est près de 0.70, ceci à cause de l'individu 9 comme nous l'avions vu lors de l'étude des histogrammes (voir figure 1). Si on fait le parallèle avec les 5 étapes de l'analyse statistique, cette figure entre dans la dernière étape qui est la présentation des résultats sous forme de graphiques simples et donne des informations sur la variable plus synthétiques que celle données par les histogrammes de la figure 1.

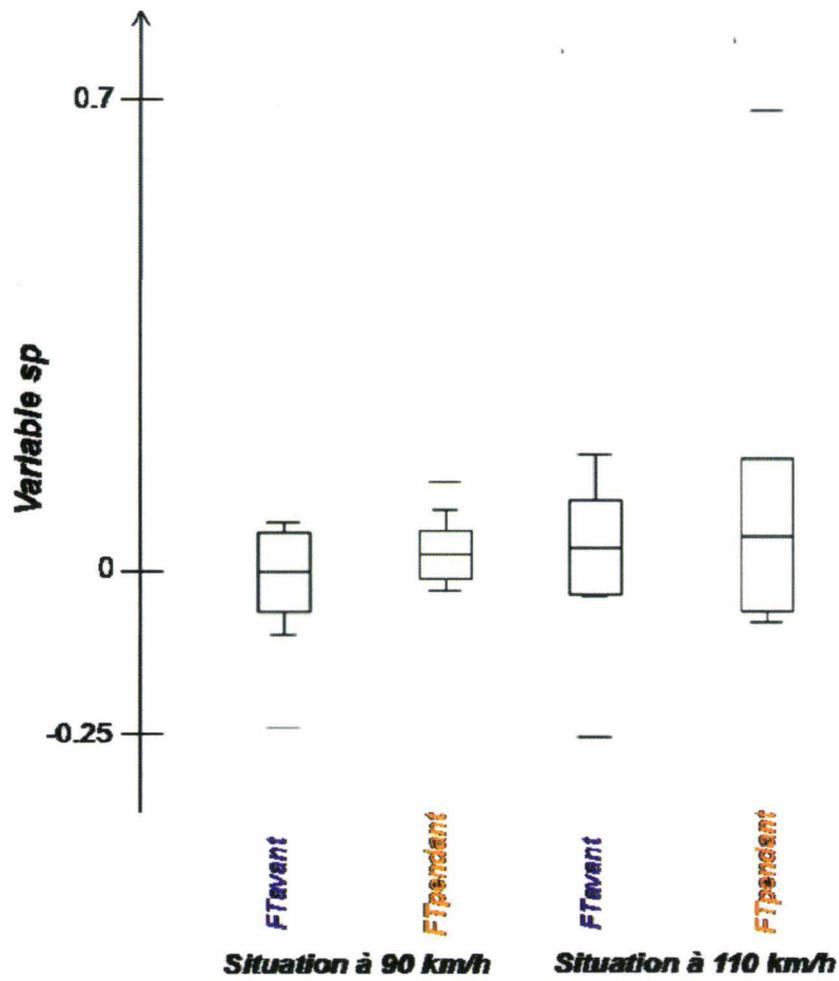


Figure 2 : Une façon de représenter la dérivée de la vitesse sp en fonction des situations et de la fenêtre temporelle (calculs faits pour 34 valeurs individuelles et VT1, c'est-à-dire une seule voiture).



Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900704