



Université de Valenciennes  
et du Hainaut Cambrésis  
Le Mont Houy, BP 311  
59304 VALENCIENNES Cedex



Fondation MAIF  
"Le Pavois"  
50 av. Salvador Allende  
79000 NIORT



Direction de la Recherche  
et de l'Innovation Automobile  
Route de Gisy  
78943 VÉLIZY-VILLACOUBLAY Cedex

**Convention de Recherche  
FONDATION MAIF / PSA / LAMIH**

Rapport final

*Octobre 1999*

*Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces  
conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic  
de l'état du conducteur*

Rédacteurs : J-C. POPIEUL (LAMIH)  
P. LOSLEVER (LAMIH)  
P. SIMON (LAMIH)  
M-A. DILLIES (PSA)  
F. NATHAN (PSA)  
A. TODOSKOFF (LAMIH)  
R. LEROUX (LAMIH)

Comité de pilotage : Mme LE GUEN (MAIF)  
A. RAULT (PSA)  
J-C. ANGUÉ (UVHC)

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>I. RAPPEL DES OBJECTIFS DE L'ETUDE</b>	<b>5</b>
<i>I.1 Contexte de l'étude</i>	5
<i>I.2 Choix méthodologiques</i>	5
<i>I.3 Variables et indices retenus</i>	6
I.3.1 Variables et indices liés à la perception de l'environnement	7
I.3.2 Variables et indices liés à l'activité comportementale du conducteur	8
I.3.3 Variables et indices liés aux actions du conducteur sur le véhicule	9
I.3.4 Variables et indices liés à la cinématique du véhicule dans l'environnement	9
<b>II. MOYENS EXPERIMENTAUX MIS EN PLACE</b>	<b>11</b>
<i>II.1 Duplication du simulateur SHERPA à l'Université de Valenciennes</i>	11
II.1.1 Configuration matérielle de SHERPA-Valenciennes	11
II.1.2 Installation de SHERPA dans les locaux du C3T	12
II.1.3 Evolutions prévues de SHERPA-Valenciennes	15
<i>II.2 Recueil de l'activité oculaire du conducteur</i>	16
II.2.1 Recueil en simulateur : oculomètre ASL 4000	16
II.2.1.1 Intégration de l'oculomètre ASL 4000 dans SHERPA	16
II.2.1.2 Synchronisation de l'oculomètre et du simulateur	17
II.2.1.3 Logiciels de post-traitements	19
II.2.1.3.1 Module de filtrage des données oculométriques brutes	19
II.2.1.3.2 Module de lancer de rayons	22
II.2.1.3.3 Synthèse des deux traitements	23
II.2.1.4 Validation du dispositif	24
II.2.1.4.1 Précision de l'oculomètre	24
II.2.1.4.2 Synchronisation oculomètre / simulateur	25
II.2.1.4.3 Filtrage des données brutes	26
II.2.1.4.4 Identification des objets par lancer de rayons	26
II.2.2 Recueil sur route : oculomètre ETS	28
II.2.2.1 Intégration de l'oculomètre ETS dans un véhicule Peugeot 605	28
II.2.2.2 Méthode utilisée pour le dépouillement des enregistrements de l'ETS	31
II.2.2.2.1 Définition des zones d'intérêt	31
II.2.2.2.2 Filtrage des données numériques	31
II.2.2.2.3 Dépouillement des vidéos	31
II.2.2.3 Evaluation de l'oculomètre et du logiciel de dépouillement	32
II.2.2.3.1 Evaluation de la qualité des acquisitions selon trois critères	33
II.2.2.3.2 Estimation de la durée d'acquisition et de traitement pour un conducteur	34
II.2.2.3.3 Synthèse critique concernant la mise en oeuvre de l'ETS	35
<i>II.3 Méthode MAP</i>	36
II.3.1 Présentation générale	36
II.3.2 Dispositifs développés pour les expérimentations sur route	37
II.3.3 Dispositifs développés pour les expérimentations en simulateur	38
<i>II.4 Synthèse des acquis concernant les moyens expérimentaux</i>	39

<b>III.</b>	<b>EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS PRELIMINAIRES</b>	<b>40</b>
III.1	<i>Expérimentation réalisée avec SHERPA-Bièvres</i>	40
III.1.1	Introduction	40
III.1.2	Protocole expérimental	40
III.1.3	Résultats de l'approche exploratoire	41
III.1.4	Résultats de l'analyse confirmatoire	43
III.1.5	Conclusion	44
III.2	<i>Expérimentation réalisée sur route avec l'oculomètre ETS</i>	45
III.2.1	Hypothèse générale de travail	45
III.2.2	Protocole expérimental	45
III.2.3	Principaux résultats	47
III.2.3.1	Répartition des fixations sur les zones générales et sur les zones dans le combiné	47
III.2.3.2	Durée moyenne des fixations	48
III.2.3.3	Amplitude moyenne des interfixations	49
III.2.3.4	Fréquence moyenne des fixations	49
III.2.3.5	Repérage des patterns oculomoteurs	50
III.2.4	Synthèse	51
III.3	<i>Expérimentations réalisées avec MAP</i>	52
III.3.1	Premières expérimentations sur route réelle	52
III.3.2	Amélioration des critères d'alerte	52
III.3.3	Une méthode objective de validation : l'analyse du comportement	53
III.3.4	Validation en conditions de roulage non contrôlées	54
III.3.4.1	Déclenchement automatique	54
III.3.4.2	Interface d'alerte	55
III.3.4.3	Mise en place d'une mini-flotte	55
<b>IV</b>	<b>EXPERIMENTATION FINALE AVEC SHERPA-VALENCIENNES</b>	<b>56</b>
IV.1	<i>Synthèse des acquis suite aux expérimentations préliminaires</i>	56
IV.2	<i>Protocole expérimental</i>	57
IV.2.1	Population de conducteurs	57
IV.2.2	Déroulement d'un test	57
IV.2.3	Définition du parcours	58
IV.2.4	Données recueillies	59
IV.3	<i>Méthodologie d'analyse des données et premiers résultats</i>	60
IV.3.1	Objectif de l'analyse statistique	60
IV.3.2	Analyse des données relatives à la voiture et à la tête	60
IV.3.2.1	Caractérisation	60
IV.3.2.1.1	Analyse comparative des méthodes de caractérisation	63
IV.3.2.1.2	Méthode de caractérisation retenue	72
IV.3.2.2	Analyse multidimensionnelle exploratoire	75
IV.3.2.2.1	ACM portant sur toutes les variables temporelles	75
IV.3.2.2.2	ACM avec suppression des variables relatives aux positions de la tête	80
IV.3.2.2.3	ACM portant uniquement sur les variables traduisant le niveau d'activité gestuelle	81
IV.3.3	Analyse des données oculaires	84
IV.3.3.1	Caractérisation	84
IV.3.3.2	Analyse multidimensionnelle exploratoire	91
IV.3.3.2.1	ACM portant sur toutes les modalités des variables temporelles	91
IV.3.3.2.2	ACM en supprimant les zones téléphone d'urgence et voiture	91
IV.3.3	Analyse conjointe des données de la voiture, de la tête et des yeux	102

<i>IV.4 Synthèse des premiers résultats</i>	105
IV.I.1 Analyses des données relatives à la voiture et aux mouvements de la tête	105
IV.I.2 Analyse des données oculaires	105
IV.I.3 Mise en relation des deux groupes de données	106
<b>VI. POURSUITE DE L'ETUDE</b>	<b>107</b>
<i>VI.1 Mise en œuvre de nouvelles approches d'analyse des données</i>	107
<i>VI.2 Extension du champ expérimental à la route réelle</i>	107
<i>VI.3 Nouvelles applications</i>	108
<b>CONCLUSION</b>	<b>109</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>111</b>
<b>PRODUCTION SCIENTIFIQUE LIÉE A L'ETUDE</b>	<b>113</b>

## INTRODUCTION

Ce document est le rapport final rédigé dans le cadre de la convention de recherche liant la Fondation MAIF, la DRIA (Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile) du groupe PSA PEUGEOT CITROËN, et le LAMIH (Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis. La convention s'intitule : *"Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic de l'état du conducteur"*.

Le rapport comporte cinq parties :

La première partie rappelle le contexte et les objectifs de l'étude.

La seconde présente les moyens expérimentaux, matériels et logiciels, mis en place pour la réalisation des expérimentations :

- duplication du simulateur de conduite SHERPA développé par PSA à l'Université de Valenciennes ;
- intégration d'un oculomètre en simulateur (ASL 4000) et en véhicule réel (ASL ETS), mise au point des outils de "dépouillement" associés ;
- développement du système MAP (Méthode d'Apprentissage Progressif) en simulateur et sur route.

La troisième partie rappelle les résultats obtenus lors des expérimentations préliminaires réalisées en simulateur avec SHERPA-Bièvres et sur route réelle.

La quatrième présente les expérimentations "finales" réalisées avec SHERPA-Valenciennes. La méthodologie d'analyse de l'ensemble des données recueillies y est exposée en détail. Les résultats obtenus avec un conducteur sont également présentés.

La cinquième et dernière partie concerne la poursuite de l'étude.

## I. RAPPEL DES OBJECTIFS DE L'ETUDE

### I.1 Contexte de l'étude

La sécurité en conduite automobile a toujours préoccupé professionnels et usagers. Depuis longtemps, les trois "éléments" constituant le système de transport : la route, le véhicule et le conducteur, ont chacun fait l'objet d'études et de mesures visant à améliorer la sécurité.

Un reproche que l'on puisse faire à ces études est que les trois "intervenants" que sont la route, le véhicule et le conducteur sont généralement considérés séparément. Si cette approche ponctuelle des problèmes de sécurité peut se justifier en ce qui concerne la route et le véhicule au travers de leurs caractéristiques purement "mécaniques", il en va tout autrement pour le conducteur.

Un parallèle avec la fiabilité humaine dans le pilotage des systèmes industriels complexes se révèle riche d'enseignements sur ce point. Tout d'abord, il convient de préciser que l'Homme ne doit pas être considéré au même titre qu'un système technique en termes de fiabilité. Son activité est loin de correspondre à la fourniture d'un service de façon plus ou moins dégradée. Bien au contraire, dans de nombreuses situations, les capacités de l'Homme permettent de compenser les limites d'un système technique, par exemple :

- dans les situations perturbées ou non définies ;
- lorsque les contraintes temporelles sont fortes ;
- lorsque la tâche est non ou mal prescrite.

Ces caractéristiques ont mis en évidence que la fiabilité humaine n'est pas dépendante uniquement des capacités propres de l'homme, mais également de la qualité du couplage entre les compétences spécifiques de l'homme et la tâche à exécuter dans des conditions données.

Il est désormais acquis que les conditions de la fiabilité humaine sont à la fois internes et externes à l'homme, de manière souvent interactive /Fadier, 94/ :

- conditions internes : formation, expérience, motivation, état psychophysiologique, ...
- conditions externes : qualité de définition de la tâche, moyens de réalisation, conditions de réalisation, apport et qualité d'informations, contraintes diverses, ...

Ainsi, dans le domaine de la conduite automobile, chercheurs et constructeurs s'accordent pour considérer que les évolutions des véhicules ne peuvent plus s'envisager uniquement d'un pur point de vue technique, mais passent nécessairement par une étude des conséquences d'une innovation sur les interactions conducteur-tâche.

### I.2 Choix méthodologiques

Dans ce but, le groupe PSA Peugeot Citroën et le LAMIH ont entamé une étude visant à caractériser les évolutions du comportement d'un conducteur automobile. Cette étude a pour objet de proposer des indicateurs objectifs et des méthodes d'analyse adaptés à :

- l'évaluation ergonomique des postes de conduite, par l'étude de l'incidence de l'ergonomie du poste de conduite sur le comportement du conducteur ;

- la caractérisation de la conduite monotone de longue durée dans un but de diagnostic de l'évolution vers un comportement de conduite accidentogène.

Compte tenu de l'importance de chacune des composantes du système Homme-Véhicule-Environnement, l'approche qui a été retenue pour cette étude considère des variables caractéristiques de chacun des sous systèmes, ou plus exactement de leurs interactions. La figure I.1 recense les quatre catégories de variables retenues :

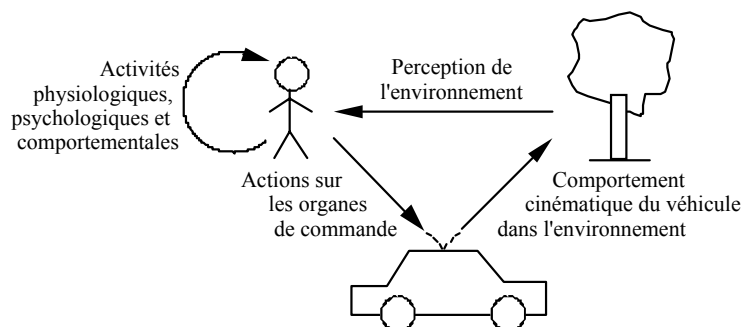


Figure I.1 : Principales catégories de variables caractérisant les interactions Homme-Véhicule-Environnement.

La première catégorie de variables caractérise la perception de l'environnement par le conducteur.

La deuxième représente les activités physiologiques, psychologiques et comportementales du conducteur. Elle est significative du niveau d'éveil de son système nerveux, du niveau d'attention et de réactivité physique.

La troisième concerne principalement les actions du conducteur sur les commandes du véhicule.

La quatrième s'applique à la cinématique du véhicule dans l'environnement routier. Elle est en fait le résultat dans l'infrastructure routière des actions du conducteur sur les commandes du véhicule.

Deux méthodes sont employées pour analyser ces variables. La première est une méthode de classification temps réel appliquée au diagnostic. Mise au point par PSA et le laboratoire HEUDIASYC de l'Université de Technologie de Compiègne, elle vise à caractériser les évolutions de comportement du conducteur par l'analyse des variables des catégories trois et quatre ci-dessus. La seconde est une méthode d'analyse multidimensionnelle a posteriori. Mise en œuvre par le LAMIH, elle a comme objectif l'identification - au sein de l'évolution des variables de l'ensemble des quatre catégories - des périodes où ces variables reflètent un comportement de conduite potentiellement dangereux. Cette méthode se veut également capable d'intégrer a posteriori les résultats de la précédente afin de vérifier qu'elles corroborent bien les mêmes faits aux mêmes moments.

### I.3 Variables et indices retenus

Ce paragraphe présente de façon succincte les principaux indices qui ont été retenus dans cette étude. Les choix résultent en grande partie d'une étude bibliographique faisant l'objet des deux premiers chapitres de la thèse de doctorat d'Alexis Todoskoff /Todoskoff, 99a/.

### I.3.1 Variables et indices liés à la perception de l'environnement

La vue étant un sens particulièrement sollicité en conduite automobile, la mesure des mouvements oculaires s'est tout naturellement imposée comme principale source d'information sur la perception de l'environnement par le conducteur. La réalisation de cette étude a donc nécessité la mise en place de deux oculomètres, le premier en environnement simulé et le second en véhicule réel, ainsi que le développement d'outils d'aide au dépouillement dont un système de traitement automatique de la direction du regard en simulateur, système original et sans concurrent à l'heure actuelle. La description de cette chaîne de traitement fait l'objet de plusieurs paragraphes dans ce rapport.

Parmi les hypothèses généralement avancées au niveau d'une modification de la prise d'informations visuelles du conducteur au cours du temps, on trouve (cf. rapports intermédiaires pour plus de détails /Todoskoff et al., 97//Dillies et al., 99/) :

- une anticipation moindre en ce qui concerne la perception de la route et la surveillance des autres usagers ;
- une plus grande difficulté à traiter les informations issues de la scène routière et de l'intérieur du véhicule i.e. un "ralentissement" du processus de prise d'informations ;
- une plus grande dépendance à l'égard des stimulus présents dans la scène routière et à l'intérieur du véhicule, c'est-à-dire une prise d'informations plus "passive".

Le tableau I.2 ci-après présente les variables sélectionnées et les hypothèses associées pour tester les symptômes ci-dessus. Ces variables peuvent se classer dans deux catégories :

- la dynamique oculomotrice : ces variables rendent compte des caractéristiques purement spatiales et temporelles des mouvements oculaires ;
- les stratégies visuelles : ces variables tiennent compte de la nature exacte des informations prélevées.

	Evolution attendue		Motif de cette évolution
	Hypovigilance	Inattention	
<b>LA DYNAMIQUE OCULOMOTRICE</b>			
Amplitude des saccades	diminution	-	exploration du champ visuel plus restreinte
Fréquence des mouvements lents (de pistage ou de compensation)	augmentation	augmentation	dépendance plus grande à l'égard des stimulus présents dans la scène routière (focalisation de l'attention)
Durée des fixations	augmentation	-	plus de difficulté à traiter les informations
<b>LES STRATÉGIES VISUELLES</b>			
Durée totale de consultation du point d'expansion	augmentation	diminution	anticipation moindre de la trajectoire du véhicule / + de dépendance à l'égard des stimulus de la scène routière
Distance des objets regardés	diminution	-	anticipation moindre
<b>LES INDICES PHYSIOLOGIQUES</b>			
Fréquence des clignements de paupières	augmentation	-	diminution du niveau d'éveil du conducteur

Tableau I.2 : Les variables relatives à la perception visuelle de l'environnement, leurs évolutions selon la dégradation du comportement du conducteur et le motif de ces évolutions.



Une troisième catégorie peut être ajoutée. En effet, les oculomètres basés sur la technique du vecteur cornéen (c'est le cas de l'ASL 4000 et de l'ETS utilisés pour cette étude) fournissent également le diamètre de la pupille et, indirectement, les clignements de paupières. Dans le cas de la conduite automobile, le diamètre pupillaire est difficilement exploitable à cause des grandes variations de luminosité (surtout sur route réelle). Par contre, de nombreux travaux ont mis en évidence l'intérêt des clignements palpébraux, d'où leur prise en compte dans notre étude.

### ***1.3.2 Variables et indices liés à l'activité comportementale du conducteur***

Le choix des variables relatives à l'activité comportementale a été restreint à celles dont la mesure induit une perturbation minimale sur le déroulement de la tâche de conduite. Ainsi, certaines variables pertinentes de la dégradation de la vigilance du conducteur n'ont pas été examinées, en particulier les indices physiologiques tels que l'EEG. Il a de plus été préféré le choix de variables dont l'emploi semble envisageable en situation réelle de conduite.

Selon ces critères, les catégories suivantes ont été retenues (tableau I.3) :

- mouvements de la tête : ces variables sont fournies par le système de suivi des mouvements de tête nécessaire au fonctionnement de l'oculomètre ASL 4000 ;
- gestuelle du conducteur : un enregistrement vidéo du conducteur est réalisé afin de permettre une analyse systématique du comportement du conducteur (voir description plus loin dans le document). Bien que d'un emploi peu réaliste dans un système automatique en situation réelle, cette technique fournit des informations particulièrement intéressantes sur le comportement des conducteurs et favorise l'interprétation des résultats obtenus avec les deux premières catégories de variables.

C'est principalement la baisse de vigilance qui a été étudiée dans la littérature au travers de l'activité comportementale du conducteur. Ainsi, deux types de phénomènes apparaissent principalement lors des périodes d'hypovigilance :

- le relâchement du tonus musculaire, caractérisé globalement par une posture "avachie" et une inclinaison de la tête vers l'avant ;
- la réactivation du conducteur afin de lutter contre l'endormissement, entraînant des mouvements brusques de redressement et des changements de posture.

	<i>Evolution attendue</i>		<i>Motif de cette évolution</i>
	<i>Hypovigilance</i>	<i>Inattention</i>	
<b>LA POSTURE</b>			
<i>Hauteur de la tête</i>	<i>diminution</i>		<i>relâchement du tonus musculaire</i>
<i>Variabilité de la hauteur de la tête</i>	<i>augmentation</i>		<i>réactivation contre l'endormissement</i>
<i>Inclinaison de la tête par rapport à la verticale</i>	<i>augmentation</i>		<i>relâchement du tonus musculaire</i>
<i>Variabilité de l'inclinaison de la tête par rapport à la verticale</i>	<i>augmentation</i>		<i>relâchement du tonus musculaire / réactivation contre l'endormissement</i>

*Tableau I.3 : Les variables relatives à l'activité posturale, leurs évolutions selon la dégradation du comportement du conducteur et le motif de ces évolutions.*

### I.3.3 Variables et indices liés aux actions du conducteur sur le véhicule

Seules les actions sur le volant et la pédale d'accélérateur ont été retenues dans le cadre de cette étude (tableau I.4). En effet, le contexte de conduite employé nécessite peu l'usage du frein et des autres commandes du véhicule (commandes de signalisation, ...).

Ainsi, l'altération du comportement du conducteur se manifeste par des actions correctrices moins fréquentes mais de plus grandes amplitudes, ce qui peut s'expliquer par :

- une diminution des capacités du conducteur à ajuster la trajectoire du véhicule sur la chaussée ;
- une diminution des capacités du conducteur à réguler sa vitesse ;
- globalement, une moins bonne implication du conducteur dans la tâche de conduite.

	Evolution attendue		Motif de cette évolution
	Hypovigilance	Inattention	
<b>L'ACTIVITÉ SUR LE VOLANT</b>			
<i>Amplitude des angles volant</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Fréquence des mouvements du volant</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Durée des périodes d'immobilité du volant</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Vitesse angulaire du volant</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<b>L'ACTIVITÉ SUR LA PÉDALE D'ACCÉLÉRATEUR</b>			
<i>Amplitude des mouvements</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à réguler la vitesse du véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Fréquence des mouvements</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à réguler la vitesse du véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>

Tableau I.4 : Les variables relatives à l'activité sur les commandes du véhicule, leurs évolutions selon la dégradation du comportement du conducteur et le motif de ces évolutions.

### I.3.4 Variables et indices liés à la cinématique du véhicule dans l'environnement

Les interactions véhicule-environnement peuvent être étudiées au travers de la performance de conduite qui est un moyen fréquemment utilisé pour détecter les dégradations de comportement du conducteur.

Cette diminution de la performance directement liée à l'activité du conducteur sur les commandes du véhicule se justifie de la même façon par :

- une diminution des capacités du conducteur à guider son véhicule ;
- une diminution des capacités du conducteur à réguler sa vitesse ;
- une moins bonne implication du conducteur dans la tâche de conduite.

La performance a été initialement caractérisée par la vitesse du véhicule, la position latérale du véhicule sur la chaussée et "l'erreur" de cap du véhicule. Les différentes variables utilisées à partir de ces indices sont présentées dans le tableau ci-après (tableau I.5).

	<i>Evolution attendue</i>		<i>Motif de cette évolution</i>
	<i>Hypovigilance</i>	<i>Inattention</i>	
<i>LA PERFORMANCE DE CONDUITE</i>			
<i>Variabilité de la vitesse du véhicule</i>	<i>modification</i>	<i>modification</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule</i>
<i>Fréquence des franchissements des lignes blanches</i>	<i>augmentation</i>	<i>augmentation</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Amplitude des écarts latéraux</i>	<i>augmentation</i>	<i>augmentation</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Vitesse latérale</i>	<i>augmentation</i>	<i>augmentation</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>
<i>Cap du véhicule par rapport au tracé de la route</i>	<i>augmentation</i>	<i>augmentation</i>	<i>diminution des capacités à guider le véhicule / moins bonne implication dans la tâche de conduite</i>

*Tableau I.5 : Les variables relatives à la performance de conduite, leurs évolutions selon la dégradation du comportement du conducteur et le motif de ces évolutions.*

Le recueil des différentes variables qui viennent d'être présentées nécessite un dispositif expérimental complexe qui fait l'objet du paragraphe suivant.

## II. MOYENS EXPERIMENTAUX MIS EN PLACE

L'étude a nécessité la mise en place de moyens expérimentaux relativement lourds. Le simulateur SHERPA développé par PSA a été dupliqué à l'Université de Valenciennes et le LAMIH y a intégré son instrumentation oculométrique. En parallèle, PSA a fait l'acquisition d'un oculomètre "tête libre" indispensable à la réalisation de mesures sur route et a poursuivi ses travaux de développement du système MAP. Les paragraphes qui suivent décrivent la mise en place de ces différents moyens expérimentaux.

### II.1 Duplication du simulateur SHERPA à l'Université de Valenciennes

Le simulateur SHERPA - acronyme de Simulateur Hybride d'Etudes et de Recherches de PSA pour l'Automobile - a été développé par la Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile. Le premier exemplaire de SHERPA est implanté dans les locaux de la SAMM à Bièvres. Le second exemplaire a donc été installé à l'Université de Valenciennes en 1997. Pour information, un troisième exemplaire est en cours d'intégration sur le site PSA de Vélizy.

#### II.1.1 Configuration matérielle de SHERPA-Valenciennes

Le simulateur SHERPA comprend trois principaux "modules" : le moteur de simulation, la cabine véhicule et le dispositif de vidéoprojection. Le moteur de simulation est identique à celui de SHERPA-Bièvres, tandis que la cabine et le vidéoprojecteur sont des éléments plus récents :

##### Moteur de simulation :

Le calculateur utilisé est une station de travail Silicon Graphics "Onyx" Reality Engine 2 identique à celle utilisée jusqu'à l'année dernière par PSA pour SHERPA-Bièvres. Il s'agit d'une machine quadrip processeur (4 processeurs R4400 cadencés à 250 MHz) sur laquelle sont centralisés la quasi-totalité des traitements :

- suivi de terrain et synthèse des images de l'environnement routier à 30 Hz (2 raster managers, résolution de 1280x1024 pixels) ;
- modèle dynamique du véhicule à 120 Hz (ARHMM) ;
- génération du retour sonore (bruits moteur et aérodynamique) ;
- gestion du trafic.

Une petite partie des traitements est réalisée par le "superviseur déporté", implanté sur une carte 68040 connectée au bus VME de l'Onyx. Il s'agit du modèle de direction qui pilote le retour d'effort volant et gère les entrées / sorties cabine (analogiques et tout-ou-rien), le tout fonctionnant à la fréquence de 1000 Hz.

##### Cabine :

Il s'agit d'une cabine fixe basée sur un véhicule réel Citroën Xantia entièrement instrumenté : volant, pédalier, boîte de vitesse, planche de bord et commodos (cf. figure II.1). Le retour d'effort au volant est assuré par un moteur électrique produisant un couple limité à  $\pm 10$  Nm. Le feedback sonore est assuré par quatre haut-parleurs disposés sous le plancher et dans les portières du véhicule.

### Dispositif de vidéoprojection :

Les images générées par le calculateur Onyx sont projetées sur un écran cylindrique de 4 x 2,5 mètres carrés de surface développée et de 3,5 mètres de rayon de courbure. Le champ visuel restitué est donc de 65 degrés en horizontal et 30 degrés en vertical. L'écran a été réalisé "en dur", sous forme d'un treillis métallique démontable recouvert de feuilles de contreplaqué, la finition étant assurée par un enduit gras et de nombreuses couches de peinture mate.

Le vidéoprojecteur est un tri-tubes 1209 de marque BARCO. Une étude détaillée des différents produits disponibles a montré que seuls les tri-tubes sont à ce jour capables de restituer une haute résolution sans compression, et donc sans dégradation. Leur principal inconvénient provient de leur faible luminosité, qui oblige à mettre en oeuvre le simulateur dans l'obscurité.

Suite aux premiers essais et afin d'obtenir la meilleure qualité possible, le projecteur de SHERPA-Valenciennes a été équipé de lentilles pour écran sphérique. Ces lentilles, spécialement réalisées par BARCO, ont permis de mieux prendre en compte le rayon de courbure de l'écran.



*Figure II.1 : Cabine Xantia du simulateur SHERPA-Valenciennes.*

### **II.1.2 Installation de SHERPA dans les locaux du C3T**

L'ensemble des équipements a été réuni en juillet 1997. La construction du bâtiment du C3T (Centre Technologique en Transports Terrestres) n'étant pas achevée, le simulateur a été assemblé provisoirement dans un local industriel loué par l'Université à l'extérieur du campus. Fin septembre, SHERPA-Valenciennes était opérationnel (figure II.2).



Figure II.2 : Installation provisoire de SHERPA-Valenciennes.

Cette installation provisoire a permis d'intégrer l'oculomètre ASL 4000 dans la cabine Xantia. De nombreux tests ont été effectués afin de déterminer la position optimale du système magnétique et un support définitif a alors été réalisé. D'autres tests ont été ensuite effectués pour améliorer la synchronisation des fonctionnements de l'oculomètre ASL (50 Hz) et de SHERPA (30 Hz).

Une première expérimentation "de rodage" a été réalisée en mai 1998 avec 10 conducteurs. Cette expérimentation a permis au personnel du LAMIH de parfaire sa formation sur SHERPA et a également révélé quelques problèmes techniques liés d'une part à l'utilisation intensive (problèmes thermiques au niveau de l'électronique de puissance) et d'autre part à un fonctionnement logiciel peu fiable sur de très longues durées. Ces problèmes sont depuis résolus.

Fin octobre 1998, SHERPA a été déménagé au C3T, sur le campus de l'Université, dans un local spécialement aménagé et dont le plan est fourni ci-après (figure II.3).

Le local SHERPA se compose de quatre pièces :

- la pièce principale, qui accueille le simulateur proprement dit ; compte tenu des évolutions futures de SHERPA, la pièce a été dimensionnée pour pouvoir accueillir un écran de 180 degrés d'ouverture (65 degrés actuellement) ainsi qu'un second écran pour la rétrovision ;
- la salle machine climatisée, qui accueille le calculateur Onyx, le générateur sonore et l'armoire électrique du retour d'effort volant ;

- le local de suivi d'essai, qui permet la supervision du simulateur et également de l'oculomètre et du système MAP ;
- une pièce polyvalente qui sert pour les briefings / débriefings, une partie des dépouillements, la maintenance du simulateur, ...

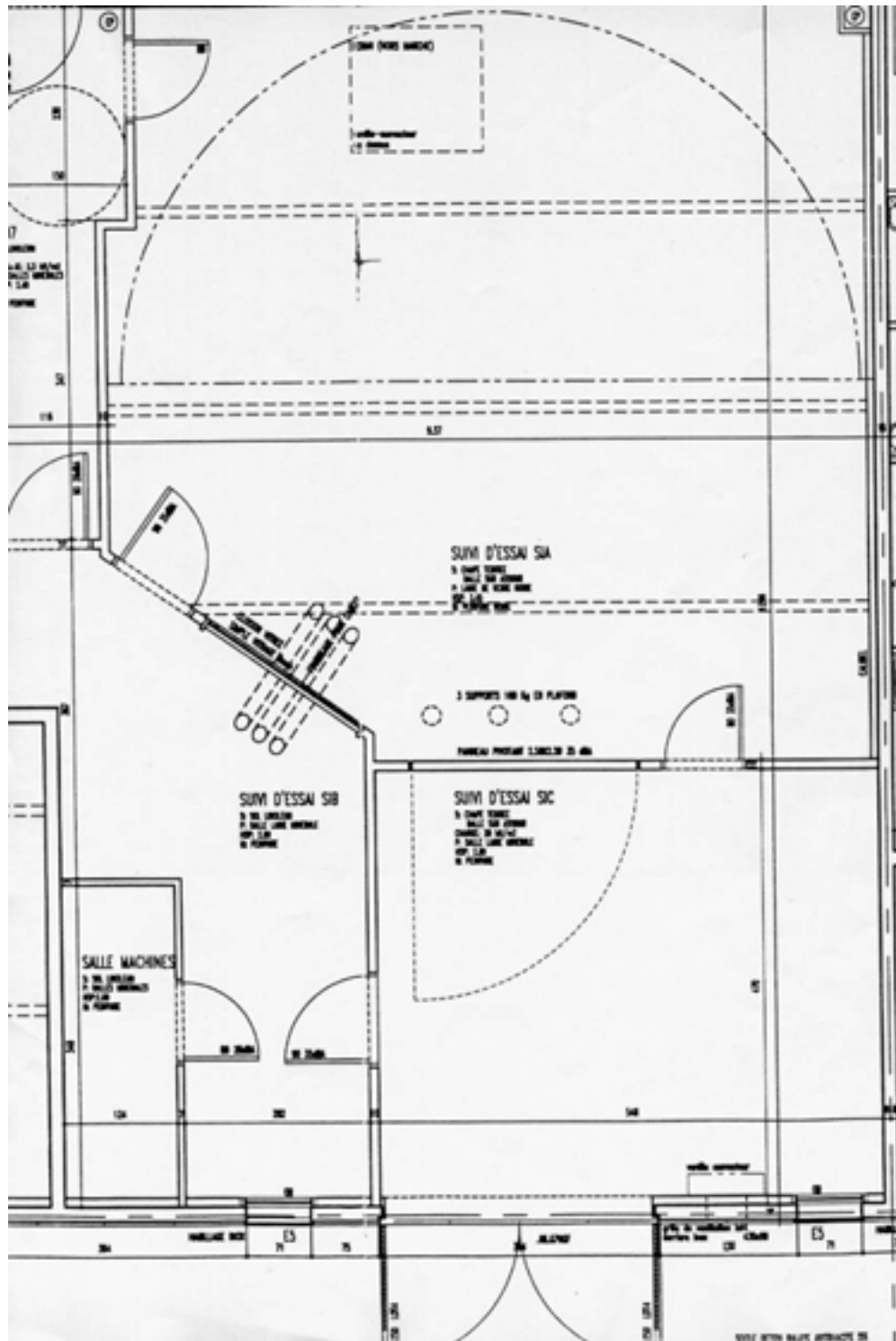


Figure II.3 : Local SHERPA au C3T.

Les expérimentations finales de la convention Fondation MAIF / PSA / LAMIH ont constitué la première utilisation intensive de SHERPA-Valenciennes. Elles se sont déroulées de février à mai 1999 et ont fait appel à plus de 40 conducteurs. Un chapitre de ce rapport leur est consacré.

### **II.1.3 Evolutions prévues de SHERPA-Valenciennes**

Suite aux expérimentations finales, et conformément à la convention d'exploitation établie entre PSA/DRIA et le LAMIH/UVHC, SHERPA-Valenciennes fait l'objet actuellement d'une mise à jour matérielle et logicielle visant à intégrer la majeure partie des évolutions récentes de SHERPA-Bièvres :

- Upgrade du système graphique du calculateur Onyx, avec passage de Reality Engine 2 à Infinite Reality. Il s'agit d'améliorer la qualité d'image et d'exploiter au mieux les performances du matériel de vidéoprojection, afin de pouvoir générer des scènes routières plus complexes.
- Modification de la commande du retour d'effort. La carte 68040 sur laquelle est implanté le superviseur déporté constitue, compte tenu des limitations de la liaison VME, un "goulot d'étranglement" relativement pénalisant. D'autre part, lors de l'utilisation intensive du simulateur de février à mai 1999, des dysfonctionnements de plus en plus fréquents sont apparus. La solution apportée par PSA consiste à remplacer la carte VME par un PC externe relié à l'Onyx via une liaison haut débit (fibre optique et cartes à mémoires réfléchies). Cette solution technique résout les problèmes récurrents rencontrés avec le couple volant mais également marque le début d'une évolution profonde de SHERPA, d'une architecture centralisée vers une architecture distribuée.
- Les deux évolutions matérielles mentionnées ci-dessus sont en cours de réalisation. Elles seront suivies d'une mise à jour du logiciel du simulateur avec le passage en version 4 (avec également un passage du système d'exploitation de l'Onyx d'Irix 6.2 à 6.5).
- En ce qui concerne les aspects logiciels, le LAMIH a fait l'acquisition du logiciel EVARISTE-réseau permettant l'édition des bases de données terrain.

L'ensemble de ces modifications font qu'avant la fin 1999, SHERPA-Valenciennes sera au niveau de SHERPA-Bièvres, support des développements du simulateur. Cette homogénéité des plate-formes constitue un atout essentiel, puisqu'il permet à PSA et au LAMIH de bénéficier des développements de chacun, en plus de faciliter la maintenance (interchangeabilité des composants).



## II.2 Recueil de l'activité oculaire du conducteur

Le paragraphe qui suit présente deux capteurs permettant le recueil de l'activité oculaire du conducteur. Chacun des deux systèmes possède ses avantages et ses inconvénients. Le premier, l'ASL 4000 du LAMIH, est utilisé en simulateur tandis que le second, l'ETS de PSA, est utilisé sur route.

### II.2.1 Recueil en simulateur : oculomètre ASL 4000

#### II.2.1.1 Intégration de l'oculomètre ASL 4000 dans SHERPA

L'oculomètre ASL 4000 (Applied Science Laboratories) se compose d'un casque pour la mesure des mouvements oculaires par la technique du "vecteur cornéen" (figure II.4) et d'un système magnétique Ascension "Flock of birds" pour la mesure des mouvements de tête (système composé d'un émetteur situé derrière la tête du conducteur, et d'un récepteur solidaire du casque de l'oculomètre). Les enregistrements sont fournis sous deux formes :

- une vidéo provenant de la caméra "scène" solidaire du casque et contenant un réticule qui matérialise la direction du regard ;
- un fichier de données brutes contenant principalement la direction absolue du regard (sous forme de coordonnées cartésiennes dans un repère lié à un plan pré-calibré plus la distance œil/plan), le diamètre pupillaire, les trois paramètres de position de la tête et les trois paramètres de rotation (la référence étant le centre de l'émetteur magnétique situé derrière la tête du conducteur) ; les données numériques sont produites à la fréquence trame des caméras vidéo (50 Hz).

L'intégration de l'oculomètre ASL 4000 dans le simulateur SHERPA pose surtout le problème de la mise en œuvre du capteur Ascension dans la cabine Xantia, c'est-à-dire dans un environnement comprenant de nombreuses masses métalliques susceptibles d'en altérer le bon fonctionnement.

Un support en aluminium (donc a-magnétique) a été réalisé et boulonné sur le plancher du véhicule, derrière le conducteur, à la place du tiers gauche de la banquette arrière (figure II.5). Ce support autorise un réglage de la position de l'émetteur magnétique selon les trois translations ainsi qu'en rotation autour de l'axe vertical. L'émetteur a été ainsi positionné derrière la tête du conducteur, légèrement décalé vers le centre de l'habitacle, à équidistance entre le pavillon et le haut du siège.

La fixation du récepteur magnétique sur le casque ASL a été modifiée afin de minimiser la distance par rapport à l'émetteur et de respecter scrupuleusement les recommandations d'Ascension en termes de position relative et d'orientation (figure II.4).

Des tests ont été réalisés afin d'évaluer la précision globale de l'instrumentation, le principal doute portant sur le bon fonctionnement du système magnétique dans l'habitacle du véhicule. Les résultats de ces tests s'avèrent concluants et sont détaillés ultérieurement.



Figure II.4 : Casque de hockey utilisé par l'oculomètre ASL 4000.



Figure II.5 : Support de l'émetteur magnétique du capteur Ascension.

### II.2.1.2 Synchronisation de l'oculomètre et du simulateur

La figure II.6 ci-après présente l'architecture matérielle et logicielle de SATMOS : Système Automatisé de Traitement des Mouvements Oculaires en Simulateur. Le dispositif comprend quatre modules, le premier (baptisé SYNCHRO) intervenant lors de la phase d'acquisition des mouvements oculaires et les trois autres (RAYPLAY, ASL\_MAG et SYNTHESE) lors des traitements a posteriori des données oculométriques.

Un problème majeur à résoudre en vue de l'automatisation du dépouillement concerne la synchronisation entre le simulateur SHERPA et l'oculomètre ASL 4000. Le simulateur réalise un archivage de ses variables internes à la "fréquence image", soit globalement à 30 Hz. Cependant, la complexité de l'image graphique à afficher détermine les temps de calcul et la fréquence d'affichage, et donc d'archivage, peut momentanément diminuer. L'oculomètre ASL 4000 quant à lui a son fonctionnement synchronisé sur les caméras vidéo, en l'occurrence à une fréquence parfaitement stable de 50 Hz.

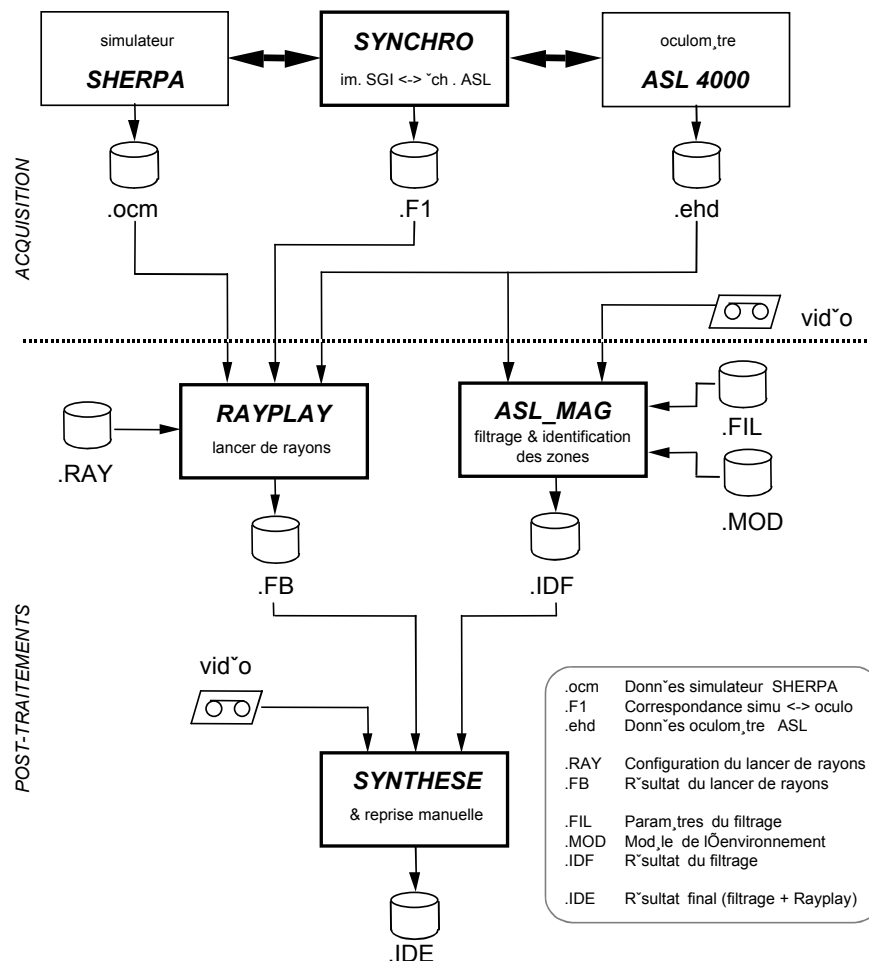


Figure II.6 : Architecture du Système Automatisé de Traitement des Mouvements Oculaires en Simulateur.

Les deux systèmes fonctionnant à des fréquences différentes, il a fallu mettre en oeuvre un "point de rendez-vous". Une troisième machine, un micro-ordinateur PC, interroge en permanence et "simultanément" le simulateur et l'oculomètre, qui lui retournent respectivement le numéro de l'image affichée et le numéro du dernier échantillon calculé (via deux liaisons série à 19200 bauds). Ces numéros pointent sur les enregistrements des deux fichiers d'archivage. Le module baptisé SYNCHRO sur la figure II.6 génère ainsi au fil de l'eau un fichier permettant la mise en correspondance d'une "position du regard" avec le contenu de l'image correspondante. Un fichier

complémentaire recense les dysfonctionnements éventuels survenus au cours de la simulation (time-out détectés au niveau des deux liaisons série servant à la communication).

La seconde fonction du PC SYNCHRO consiste à piloter, en début et en fin de simulation, les enregistrements sur les équipements périphériques du simulateur. La machine dispose pour cela d'entrées/sorties tout-ou-rien (nécessaires pour télécommander l'archivage sur l'oculomètre ASL) ou de liaisons séries (cas des magnétoscopes et des générateurs de time-code utilisés pour l'image scène de l'oculomètre, la vidéo du visage du conducteur, ...). Cette fonction garantit une parfaite synchronisation entre les différents archivages et permet également d'alléger la charge de travail de l'expérimentateur qui peut commander simultanément l'ensemble des équipements.

### II.2.1.3 Logiciels de post-traitements

Les post-traitements oculométriques se décomposent en trois principaux modules :

- 1) Filtrage des données brutes (module baptisé ASL\_MAG) : Le contenu du fichier de données produit par l'oculomètre est analysé afin de décomposer l'activité oculaire du conducteur sous forme d'une succession de quatre entités de base qui sont les saccades, les fixations, les mouvements lents et les pertes (ces quatre entités sont définies ultérieurement).
- 2) Lancer de rayons (module baptisé RAYPLAY) : Il s'agit de déterminer, pour chaque échantillon de l'oculomètre appartenant à la scène routière, l'objet ou la zone "intersecté" par le regard du conducteur. Un tel traitement nécessite un rejeu complet de la simulation.
- 3) Synthèse des deux traitements précédents : Concernant la perception visuelle, une hypothèse est généralement admise, selon laquelle les informations sont prélevées au cours des fixations et des mouvements lents (phénomène de "suppression saccadique"). En conséquence, seuls les résultats des lancers de rayons correspondant à ces deux types d'entité sont pris en compte. Un algorithme présenté ultérieurement permet, à partir des résultats des lancers de rayons appartenant à une seule et même entité, de déterminer l'objet ou la zone regardé. Une "reprise manuelle" est prévue pour les cas non pris en compte dans l'algorithme.

Sur le plan matériel, les modules de filtrage et de synthèse sont implémentés sur PC, tandis que le module de lancer de rayon s'effectue sur la station de travail SGI Onyx du simulateur SHERPA.

#### II.2.1.3.1 Module de filtrage des données oculométriques brutes

##### • Description de l'algorithme :

L'oculomètre ASL mesure la direction absolue du regard à la fréquence de 50 Hz. L'étape de filtrage consiste à transformer cet échantillonnage en une succession de quatre entités oculométriques de base qui sont :

- les fixations, pendant lesquelles le regard est relativement stable ;
- les mouvements lents, pendant lesquels le regard du conducteur se "verrouille" sur un objet et se déplace de manière lente et continue (mouvements de poursuite ou de compensation) ;
- les saccades, qui correspondent à des sauts rapides du regard ;
- les pertes, qui correspondent aux périodes de "dysfonctionnement" du capteur, notamment lors des clignements de paupières.

Les données de départ de l'algorithme sont les déviations angulaires horizontale et verticale, la vitesse angulaire de l'œil (calculée à partir des signaux de position) et le diamètre pupillaire. L'algorithme met en oeuvre une base de règles et de paramètres physiologiques, en procédant par éliminations successives. Les quatre types d'entités sont ainsi identifiés en quatre "passes" :

#### 1) Identification des clignements de paupières et des "pertes" :

Le signal diamètre pupillaire permet, après filtrage, d'identifier clairement les clignements de paupières. Concernant les dysfonctionnements, les principales causes sont les suivantes :

- un fonctionnement en périphérie du champ de mesure, au niveau des mouvements oculaires par rapport à la tête (champ de 40 x 30 degrés) ou au niveau de la direction absolue du regard (coordonnées cartésiennes en dehors des plans pré-calibrés) ;
- les périodes de fonctionnements pendant lesquelles la pupille est occultée en grande partie par les cils et/ou par la paupière (cas notamment des brefs coups d'œil vers le bas sans mouvements de tête d'accompagnement) ;
- les grandes variations de l'ambiance lumineuse.

Les critères utilisés portent donc sur le diamètre pupillaire (valeurs minimale et maximale, ajustées pour chaque conducteur), la vitesse angulaire de l'œil (inférieure à la vitesse maximale d'une saccade, de l'ordre de 600 °/s), et la plage de variation des coordonnées X et Y de la direction absolue du regard (qui doivent demeurer à l'intérieur des plans pré-calibrés c'est-à-dire principalement la scène routière et le tableau de bord).

#### 2) Identification des saccades :

Le critère d'identification idéal des saccades est le profil d'accélération angulaire. Cependant, une fréquence d'échantillonnage de seulement 50 Hz rend difficile une double dérivation. Un simple critère de vitesse est donc utilisé. De nombreux travaux montrent que la vitesse maximale d'un mouvement lent se situe aux alentours de 45 °/s, ce qui constitue notre critère de vitesse. Un second critère prend en compte la "linéarité" des saccades, souvent décrite sous la forme d'un mouvement balistique (critère d'alignement des échantillons successifs appartenant à une même saccade).

#### 3) Identification des fixations :

Il est généralement admis qu'une prise d'information réalisée au cours d'une fixation nécessite une durée minimum de 100 ms. Par ailleurs, aucune durée maximum n'est mise en évidence. Sur le plan spatial, la direction du regard est affectée par les micro-mouvements naturels du globe oculaire ainsi que le bruit de mesure inhérent au capteur. Ainsi, une fixation est définie comme un nuage d'échantillons d'une durée d'au moins 100 ms et inscrit dans un cône d'environ 1,5° d'ouverture (le sommet du cône étant l'œil).

#### 4) Traitement des "résidus" du filtrage :

A ce niveau du filtrage, de nombreux petits groupes d'échantillons "indéterminés", de durées inférieures ou égales à 60 ms sont observés. Ces groupes sont généralement situés entre deux entités déjà identifiées (pertes, clignements de paupières, fixations ou saccades) et proviennent principalement des "effets de bord" inhérents au seuillage du signal vitesse pour l'identification des

saccades. Ces petits groupes d'échantillons se révèlent être le début ou la fin de saccades de grandes amplitudes, ou encore des "micro-saccades" entre deux fixations très proches. Une matrice de décision permet, compte tenu de la nature des entités précédente et suivante, de trancher quant à la nature du groupe indéterminé.

A ce stade du traitement, tous les groupes "indéterminés" restants d'une durée supérieure ou égale à celle d'une fixation sont considérés comme des mouvements lents potentiels. Un test est réalisé en procédant par agrégations successives : les échantillons successifs de l'entité sont parcourus, en comparant à chaque fois la somme de tous les écarts angulaires inter-échantillons à l'écart angulaire global de l'entité i.e. entre le premier et le dernier échantillon. Cette comparaison permet de détecter les groupes d'échantillons "ordonnés" caractérisant les mouvements lents.

- Développements logiciels :

Cet algorithme est intégré au logiciel ASL\_MAG qui réalise les fonctions suivantes :

- paramétrage de l'algorithme de filtrage ;
- visualisation des données oculométriques brutes et filtrées, avec diverses représentations graphiques (un exemple est fourni en figure II.7) ;
- mise en correspondance bidirectionnelle données numériques / images vidéo ;
- calculs statistiques sur les données brutes et filtrées ;
- identification du lieu des consultations en termes de "zones d'intérêt".

Sur ce dernier point, il s'agit principalement de différencier les consultations concernant la scène routière (i.e. sur l'écran cylindrique du simulateur) des consultations concernant le véhicule (i.e. le tableau de bord, les rétroviseurs, etc.). Pour cela, il faut disposer d'une description géométrique de l'environnement du simulateur sous forme de différents "plans" eux-mêmes décomposés en "zones d'intérêt" pouvant être de formes diverses : rectangle, polygone, cercle ou ellipse. Cette description est réalisée à l'aide d'un éditeur graphique intégré au logiciel ASL\_MAG, éditeur qui lit le fichier "environnement" généré par l'oculomètre ASL à l'issue de la phase de modélisation de l'environnement et permet ensuite d'enrichir chacun des plans définis d'un ensemble plus ou moins complexe de zones. Cette description est réalisée une fois pour toutes au début d'une nouvelle série d'expérimentations.

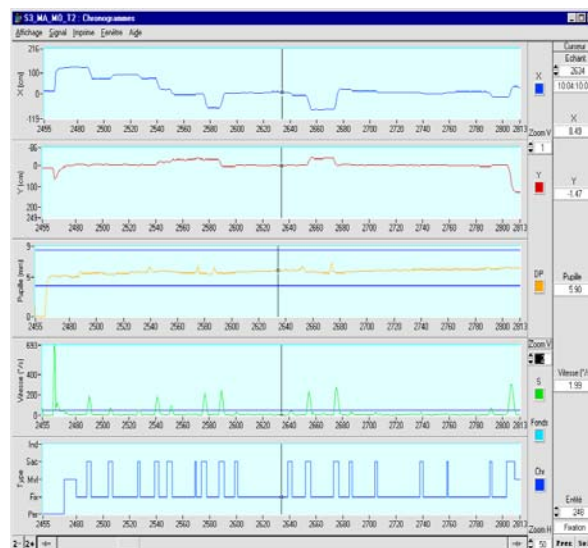


Figure II.7 : Interface du logiciel ASL\_MAG incorporant l'algorithme de filtrage.

Sur la figure II.7, les deux courbes du haut présentent les déviations horizontale et verticale du regard. Les deux courbes suivantes présentent le diamètre pupillaire ainsi que la vitesse angulaire de l'oeil. La cinquième et dernière courbe présente le résultat du filtrage sous forme d'un chronogramme. Les enregistrements vidéo sont automatiquement positionnés sur les images correspondant au curseur.

En résumé, à l'issue de la phase de filtrage, les données oculométriques brutes sont transformées en une suite d'entités de types fixation, mouvement lent, saccade et perte, avec pour les deux premiers types une zone associée : tableau de bord, rétroviseur, scène routière, ... Les consultations à l'intérieur de la scène routière nécessitent alors un traitement complémentaire visant à déterminer l'objet précis regardé. C'est le rôle du module de "lancer de rayons".

### II.2.1.3.2 Module de lancer de rayons

Les données contenues dans le fichier d'archivage du simulateur permettent le "rejeu" complet d'une simulation. Lors de ce rejeu, la direction du regard est "superposée" au contenu de l'image, ce qui permet de détecter l'objet intersecté par une technique de "lancer de rayon". Notons que compte tenu des fréquences d'archivage différentes, deux échantillons ASL consécutifs peuvent correspondre à une seule et même image du simulateur.

Afin de tenir compte de l'erreur intrinsèque de l'oculomètre, plusieurs lancers de rayons sont en fait effectués pour chaque échantillon. L'idée consiste à effectuer un test non pas uniquement sur les coordonnées XY retournées par le capteur, mais plutôt sur un "disque" d'environ un degré, centré sur ces coordonnées. Le disque correspond dans la pratique à un nombre fini de rayons dont la configuration est définie dans un fichier de paramétrage.

La figure II.8 présente l'interface du module RAYPLAY. Les trois petites fenêtres situées en haut de l'écran permettent d'afficher des informations générales sur les fichiers en cours de traitement, de commander le défilement des images, et d'afficher le résultat des lancers de rayons. La fenêtre principale reproduit à l'identique l'image générée en temps réel au cours de la simulation. Un réticule matérialise les différents rayons (neuf dans l'exemple de la figure II.8).



Figure II.8 : Interface du module de lancer de rayons RAYPLAY.

Les objets appartenant à la base de données visuelle et "identifiables" par lancer de rayon varient en fonction du contexte :

- Terrain : à droite de la route, à gauche et au loin (au-dessus de la ligne d'horizon) ;
- Chaussée : chaussées de droite et de gauche, voies d'accélération et de décélération (autoroute) ;
- Marquage au sol : lignes matérialisant le bord des voies (y compris les rambardes de sécurité sur autoroute et les bermes sur route), lignes inter-voies ;
- Signalisation verticale et mobilier : panneaux divers, cônes de chantier, téléphones d'urgence (autoroute), ...
- Végétation (arbres) ;
- Constructions : maisons, fermes, hangars, ...
- Autres usagers : différents véhicules composant le trafic ;
- Piétons éventuels.

Pour chaque échantillon retourné par l'oculomètre, le résultat du lancer de rayons consiste en une liste d'objets intersectés (plus exactement une liste de "familles" d'objets) ainsi que les distances objets/conducteur. Dans le cas de la figure II.8, chaque lancer de rayons comprend 9 tests : au niveau des coordonnées XY retournées par l'oculomètre ainsi qu'à 0,5 et 1° dans la direction des quatre points cardinaux.

### II.2.1.3.3 Synthèse des deux traitements

Les deux traitements décrits précédemment peuvent s'exécuter en parallèle, étant implémentés sur des machines différentes : PC pour le filtrage des données oculométriques et SGI Onyx pour le lancer de rayon. Le quatrième et dernier module de SATMOS - implanté sur PC - réalise la synthèse des résultats de ces deux traitements.

Cette ultime passe consiste à parcourir le fichier résultat du filtrage et à prendre en compte, pour toutes les "consultations" (fixations et mouvements lents) identifiées à l'intérieur de la scène routière, le résultat des lancers de rayons correspondants. Le nombre de lancers de rayons est égal au nombre d'échantillons de la consultation que multiplie l'effectif du lancer de rayons, aux effets de bord près.

Un algorithme permet, à partir de la liste des objets intersectés, de déterminer l'objet précis consulté par le conducteur ainsi que la distance d'observation de cet objet. Il s'agit d'un choix multicritère qui tient compte, pour chaque objet "candidat", du nombre total de fois qu'il a été intersecté, du nombre de lancers de rayons au cours desquels il a été intersecté, de son rang dans une "hiérarchie" qui tient compte de la nature et de la taille des objets (humains, mobiles, panneaux, ...).

Lorsque le choix de l'objet s'avère problématique, il incombe au "dépouilleur" de lever l'indétermination. Cette reprise manuelle des cas difficiles s'effectue directement au cours du traitement, ou globalement lors d'une phase de correction a posteriori. Le logiciel positionne alors automatiquement les enregistrements vidéo sur les images correspondantes. En effet, l'oculomètre fournit des enregistrements vidéo plus précis que le contenu des fichiers de données, ces enregistrements n'étant pas tributaires de la précision du système magnétique de suivi de mouvements de tête.

La figure II.9 présente l'interface de dialogue du logiciel. La fenêtre de droite présente le résultat



des lancers de rayons sous forme d'un histogramme. En cas d'impossibilité de choix d'un objet particulier en automatique, le "dépouilleur" indique son choix en cliquant directement sur une barre de l'histogramme, ou en choisissant dans la liste des objets Rayplay. Le résultat du dépouillement s'affiche au fur et à mesure dans la fenêtre de gauche.

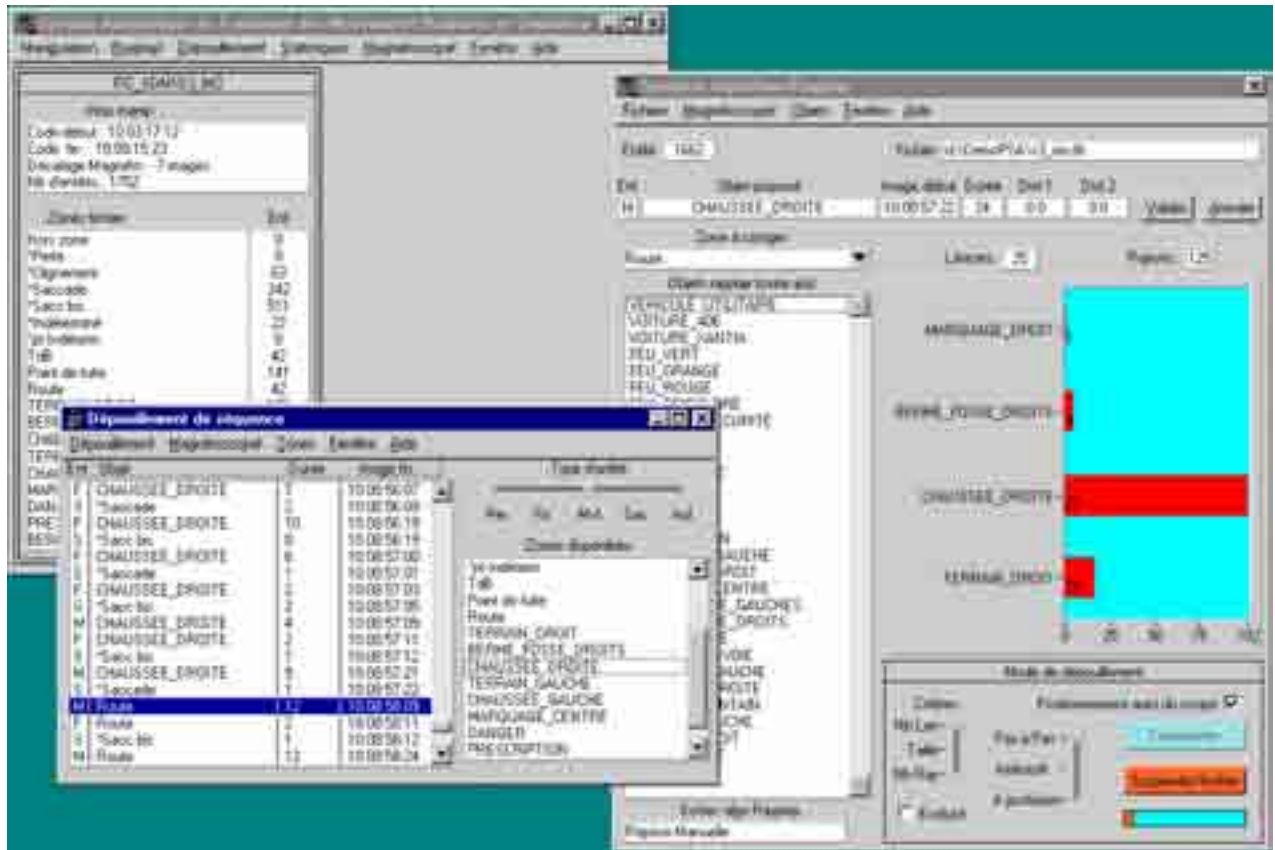


Figure II.9 : Interface du module de " synthèse " des résultats issus du filtrage et du lancer de rayons.

A l'issue des différents traitements qui viennent d'être décrits, on obtient l'activité oculaire du conducteur sous forme d'une succession de fixations, mouvements lents, saccades et pertes avec, dans les deux premiers cas, les "objets" correspondants (appartenant à la scène routière ou au véhicule) ainsi que leurs distances par rapport au conducteur (distance "virtuelle" dans le cas de la scène routière, réelle dans le cas du véhicule). L'opération de "dépouillement" est alors terminée.

## II.2.1.4 Validation du dispositif

### II.2.1.4.1 Précision de l'oculomètre

Les résultats fournis ci-après concernent la chaîne oculométrique complète, c'est-à-dire l'ASL 4000 plus le capteur Ascension. Les tests réalisés consistent à afficher la mire de calibration de l'oculomètre sur l'écran du simulateur (champ de 30 x 18 degrés ou 190 x 108 centimètres) et à demander au conducteur de fixer successivement chacun des neuf points. Les données sont enregistrées uniquement pendant les phases de fixation des différents points.

Fournie à titre d'exemple, la figure II.10 présente l'erreur de mesure moyenne obtenue pour un seul et même conducteur. L'erreur est exprimée en centimètres et fournie pour chacun des 9 points

de la mire. L'image du simulateur est projetée sur l'écran de telle sorte que l'œil du conducteur soit aligné sur le point central – qui correspond par ailleurs au "point de fuite" de la scène routière – à une distance d'environ 350 cm. Dans ces conditions, un angle de 1 degré correspond à une distance d'environ 6 cm au voisinage du point central et de 6,5 cm au voisinage des points périphériques. La figure II.10 montre que l'erreur totale de l'oculomètre est de l'ordre de 1°. Elle est donc conforme aux spécifications du constructeur qui annonce d'une part mieux que 1° pour le casque dans cette plage de mesure, et d'autre part 0,5° et 1 mm pour le système magnétique.

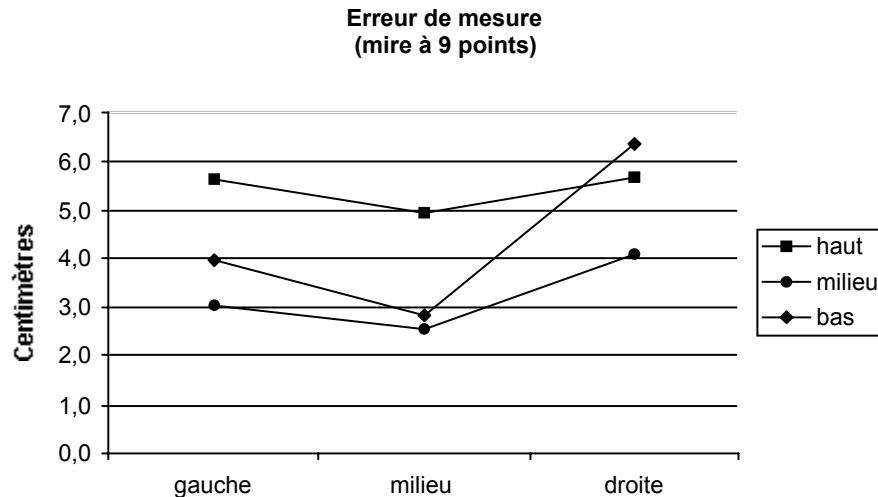


Figure II.10 : Erreur de mesure moyenne sur les 9 points de la mire de test.

La dispersion de la distance des échantillons par rapport aux barycentres des nuages a été calculée pour les 9 points de la mire. Cette dispersion rend compte du bruit de mesure et également de l'agitation naturelle du globe oculaire. Elle est de l'ordre de plus ou moins 0,5° autour de la position moyenne, ce qui est également conforme aux spécifications du constructeur.

En conclusion, il est clair que les performances du système ASL 4000, en termes d'erreur moyenne et de dispersion, dans l'environnement du simulateur SHERPA sont légèrement dégradées par rapport à celles relevées en laboratoire, dans des conditions "idéales" d'utilisation. Cette dégradation provient en grande partie des perturbations magnétiques inhérentes à l'habitacle du véhicule, mais également de difficultés de réglage. D'une part, la phase de "modélisation de l'environnement" préalable à l'utilisation de l'oculomètre nécessite de mesurer, au travers du pare-brise, les distances entre l'émetteur magnétique et 3 points périphériques de la mire de calibration, opération qui s'avère délicate. D'autre part, il existe une autre source d'erreur liée au fait que l'oculomètre ASL travaille dans des plans pré-calibrés alors que la mire utilisée pour les tests est projetée sur un écran cylindrique de 3,50 m de rayon.

Les résultats obtenus restent néanmoins dans les limites des spécifications du constructeur et les tests de précision s'avèrent concluants.

#### II.2.1.4.2 Synchronisation oculomètre / simulateur

Concernant la synchronisation SHERPA / ASL, les résultats des tests montrent que les défauts proviennent exclusivement de l'oculomètre. Globalement, sur l'ensemble des tests soit plus de 6 heures de simulation, la synchronisation s'avère défectueuse sur une durée totale correspondant à 0,6 % des échantillons ASL. Ces dysfonctionnements proviennent de la capacité de traitement limitée

du PC ASL. En effet, lorsque l'image de l'oeil est complexe à analyser, de par la présence de reflets ou de cils, la contrainte "temps réel" empêche le PC de communiquer le numéro d'échantillon au module SYNCHRO via la liaison série. Une étude détaillée des résultats montre d'ailleurs que le nombre de défauts de synchronisation est fortement corrélé au nombre de clignements de paupières.

Il convient de souligner que ces dysfonctionnements n'ont pratiquement pas d'incidence sur le résultat du dépouillement. En effet, les clignements de paupières ne nécessitent pas la prise en compte du résultat du lancer de rayon. D'autre part, le principe de la "fusion" des résultats du filtrage et du lancer de rayon est tolérant aux défauts de synchronisation, puisque le choix d'un objet peut s'effectuer en l'absence d'un lancer de rayon - voire plusieurs - sur la durée de l'entité.

#### II.2.1.4.3 Filtrage des données brutes

La validation de l'algorithme de filtrage consiste à comparer les résultats du traitement informatique des fichiers (réalisé à l'aide du logiciel ASL\_MAG) à ceux d'un dépouillement manuel minutieux des enregistrements vidéo correspondants. Trois sujets ont été sélectionnés pour la très bonne précision de leurs enregistrements. Les mêmes séquences ont été "dépouillées" pour les trois sujets, représentant une durée totale de 18 minutes.

Les cinq entités identifiées sont donc : les fixations, les mouvements lents, les saccades, les pertes, ainsi que les indéterminés dans le cas du traitement automatique. Ces indéterminés constituent une entité à part entière mais représentent un pourcentage négligeable. La comparaison porte, pour chacune des 5 entités, sur la durée totale, l'effectif total, et la distribution des durées.

Fournie à titre d'exemple, la figure II.11 présente les durées cumulées (exprimées en %) des 5 entités obtenues suite au traitement automatique et au dépouillement manuel. Ces résultats mettent en évidence le bon fonctionnement de l'algorithme de filtrage.

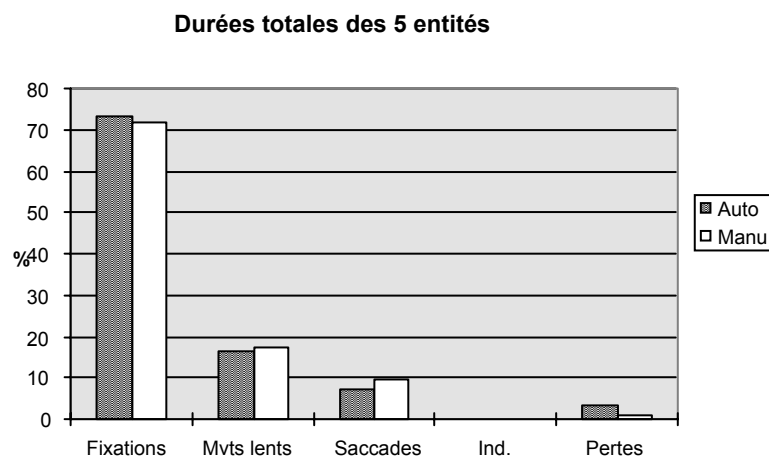


Figure II.11 : Durées totales des 5 entités.

#### II.2.1.4.4 Identification des objets par lancer de rayons

Fournie à titre d'exemple, la figure II.12 présente le résultat brut d'un dépouillement réalisé avec SATMOS pour un seul et même conducteur. Elle concerne un trajet autoroutier de 20 minutes.

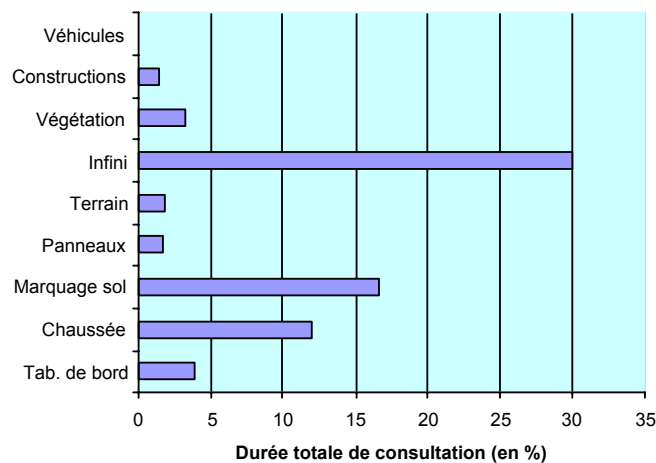


Figure II.12 : Histogramme fourni par SATMOS.

Les zones ou objets ont été regroupés pour plus de clarté. La zone "Infini" comprend le paysage au-dessus de la ligne d'horizon. Le "Terrain" désigne le paysage de part et d'autre de la chaussée, à l'exclusion de l'Infini. Les rails de sécurité sont inclus dans le marquage au sol.

Les premiers dépouillements réalisés font apparaître un taux de reprise en manuel très faible, inférieur à 5%. Une validation a été réalisée, consistant à comparer les résultats obtenus en automatique à ceux issus d'un dépouillement manuel des enregistrements vidéo. Cette validation a montré le bien-fondé de l'algorithme de sélection de l'objet regardé par le conducteur (traitement en aval du lancer de rayons).

**La mise en oeuvre de SATMOS met en évidence un gain de temps significatif de l'ordre de 20 par rapport à un dépouillement manuel.** Ce gain peut varier d'un sujet à l'autre car il dépend du bon fonctionnement de l'oculomètre au cours de l'expérimentation. Chez quelques sujets, une dérive peut apparaître (généralement verticale vers le bas, liée au poids du casque) et une procédure de SATMOS permet alors la détermination d'offsets de correction, éventuellement variables au cours du temps. Pour ces sujets "à problèmes", le gain de temps reste conséquent, entre 10 et 15.

## II.2.2 Recueil sur route : oculomètre ETS

### II.2.2.1 Intégration de l'oculomètre ETS dans un véhicule Peugeot 605

En vue de la réalisation d'expérimentations sur route réelle, la DRIA a fait l'acquisition d'un oculomètre Eye Tracking System Version 3.0 (ETS). Ce capteur, initialement développé par Dornier en Allemagne, est désormais commercialisé par la société américaine Applied Science Laboratories (ASL).

L'ETS présente le double avantage de fonctionner "tête libre", c'est-à-dire sans aucun contact physique avec le conducteur (contrairement à l'ASL 4000 qui nécessite le port d'un casque), et en lumière du jour (l'ASL 4000 a été conçu pour fonctionner dans une ambiance lumineuse "contrôlée").

La technique de mesure est la même que pour l'ASL 4000 (technique du "vecteur cornéen"). Une source infrarouge éclaire l'oeil du conducteur. Cette source permet, en plus d'éclairer le globe oculaire, de matérialiser sur la cornée une référence par rapport à laquelle les déplacements de la pupille vont être mesurés par traitement d'images de l'oeil. Notons au passage que les capteurs fonctionnant sur cette technique fournissent généralement, en plus des mouvements oculaires, une mesure du diamètre pupillaire ainsi qu'une détection des clignements de paupières.

Les principales caractéristiques de l'ETS sont (données constructeur) :

- champ de mesure de  $\pm 30$  à  $\pm 45$  degrés en horizontal et de  $\pm 15$  à  $\pm 25$  degrés en vertical ;
- distance oeil / module optique comprise entre 0,6 et 1,1 mètres ; l'ETS peut tenir compte de mouvements de tête horizontaux et verticaux d'une amplitude de  $\pm 10$  % maxi de cette distance, et jusqu'à  $\pm 6$  % dans la direction avant / arrière ;
- précision d'environ 1 degré.

Le véhicule équipé est une Peugeot 605 à boîte de vitesse automatique et équipé d'une climatisation afin de compenser la quantité de chaleur générée par l'ensemble du matériel embarqué. Le matériel est alimenté par la batterie du véhicule et un onduleur.

La figure II.13 ci-après illustre l'installation de l'oculomètre ETS dans le véhicule :

- Contrairement à l'ASL 4000, deux sources infrarouges sont utilisées et disposées de part et d'autre du tableau de bord (cf. figure II.14). Cette configuration permet d'accroître le champ de mesure horizontal qui englobe les deux rétroviseurs extérieurs. Les sources sont pulsées et synchronisées sur les caméras vidéo, une grande puissance lumineuse étant nécessaire pour un bon traitement d'image de l'oeil.
- Le module optique "oeil" est incrusté dans le tableau de bord, dans la partie supérieure de la console centrale (cf. figure II.14). Il contient la caméra "oeil" équipée d'un zoom ainsi que deux miroirs rapides permettant de compenser les mouvements de tête. La rapidité de déplacement de ces deux miroirs ainsi que l'algorithme performant de recherche de l'oeil après rupture du suivi font également partie des points forts de l'oculomètre ETS .
- La caméra "scène" est fixée à droite et juste derrière la tête du conducteur (cf. figure II.15). Comme pour l'ASL 4000, la direction du regard est matérialisée dans l'image scène par un réticule. Elle est également stockée dans un fichier de données en vue des traitements informatiques.

- Le reste du matériel, disposé dans le coffre du véhicule, comprend deux racks : le premier pour l'interfaçage avec les modules optiques, le second pour la partie informatique et traitement d'image. A ce sujet, l'ETS a la particularité d'implémenter une reconnaissance de formes temps réel pour la pupille et les reflets cornéens.

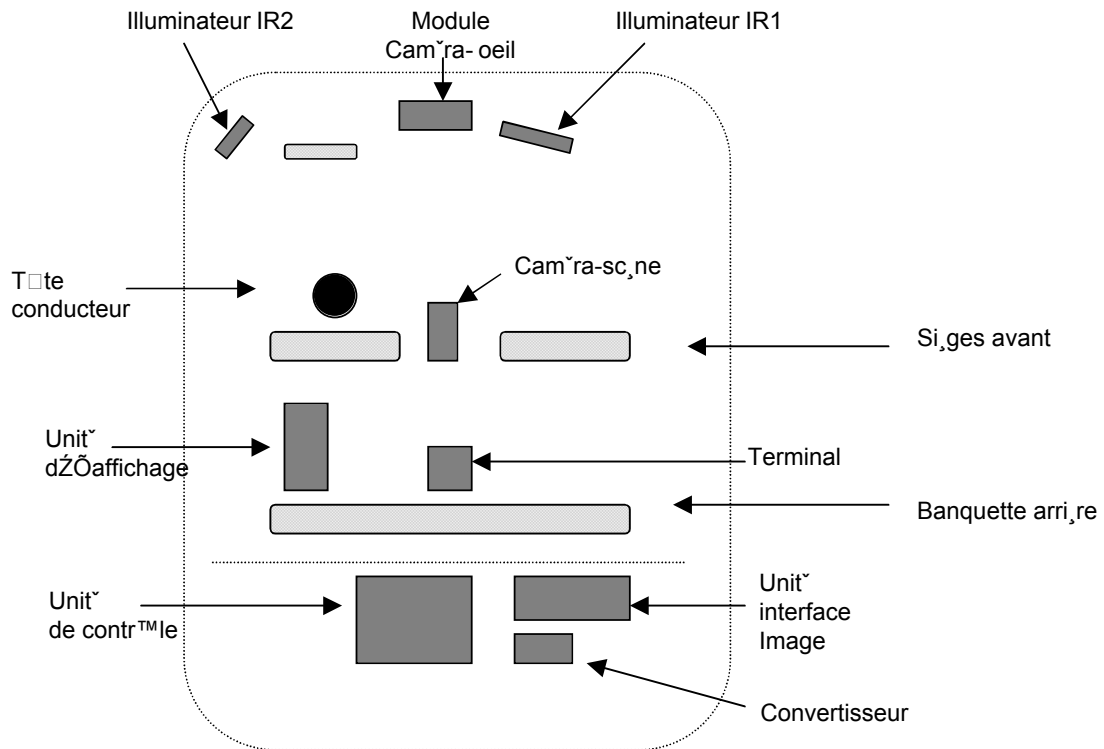


Figure II.13 : Schéma fonctionnel de l'installation de l'oculomètre ETS dans un véhicule Peugeot 605.

La calibration de l'ETS est similaire à celle de l'ASL 4000. Une mire de calibration à 9 points a été dessinée sur une planche de plexiglass (cf. figure II.14). Pendant les réglages, cette mire est disposée sur le capot du véhicule, devant les yeux du conducteur qui fixe alors un à un les différents points. La calibration "courte distance" est ensuite complétée par une mini-calibration "longue distance" afin de prendre en compte les erreurs de parallaxe.



Figure II.14 : Module "oeil" et sources infrarouge installés sur le tableau de bord de la 605.



Figure II.15 : Caméra "scène" (entre les sièges avant), PC de dialogue et moniteurs vidéo de l'ETS (image oeil à gauche et image scène à droite).

## II.2.2.2 Méthode utilisée pour le dépouillement des enregistrements de l'ETS

Le dépouillement des enregistrements de l'ETS s'effectue en trois étapes : définition des zones d'intérêt, filtrage des fichiers de données brutes et dépouillement des enregistrements vidéo.

### II.2.2.2.1 Définition des zones d'intérêt

La première opération à effectuer après chaque acquisition (plus exactement après chaque modification de la position de la caméra scène dans l'habitacle) consiste à définir les différentes zones d'intérêt de la planche de bord. Ce découpage est réalisé à l'aide du logiciel EYENAL fourni par ASL. La figure II.16 ci-après présente le découpage réalisé pour l'expérimentation exploratoire de 1998.

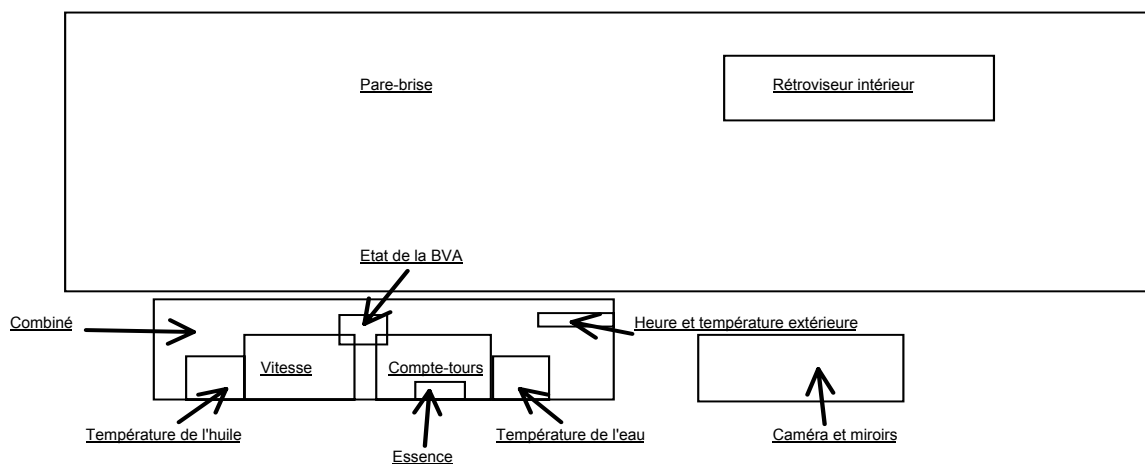


Figure II.16 : Zones d'intérêt définies.

Soulignons que la zone "pare-brise" - à l'exclusion du rétroviseur intérieur - est définie avant l'acquisition car elle est utilisée par l'ETS en temps-réel, lors de la mesure, pour décider s'il faut appliquer ou non la correction de parallaxe.

### II.2.2.2.2 Filtrage des données numériques

Le logiciel EYENAL permet également de filtrer le contenu des fichiers de données brutes. Sont identifiées les fixations et les "pertes" (clignements de paupières et dysfonctionnements du capteur), les périodes restantes étant supposées être les saccades. Il n'y a pas d'identification des mouvements lents.

Suite à ce filtrage, le lieu des fixations est identifié en utilisant le découpage en zones réalisé préalablement. En ce qui concerne le lieu des fixations à travers le pare-brise, un dépouillement manuel des enregistrements vidéo est nécessaire.

### II.2.2.2.3 Dépouillement des vidéos

Le but principal du dépouillement manuel des enregistrements vidéo est d'identifier les objets consultés à l'intérieur de la scène routière. Il permet également de caractériser la situation de conduite : voie empruntée par le véhicule sujet, trafic présent, voire infrastructure environnante.



Le dépouillement est réalisé avec le tableur EXCEL, en utilisant comme point de départ la liste des fixations identifiées par EYENAL. Le tableau de la figure II.17 fournit un exemple de "grille d'observation" issue du dépouillement.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Temps	N°fix	Zone	Durée	F1	F2	F3	F4	Environnement			
00:00:01.680	1	RETRO INT	0.220	C		X				V	PONT
00:00:01.680	1	PAREBRISSE	0.220								
00:00:00.060	x										
00:00:00.100	x										
00:00:00.820	x										
00:00:00.840	x										
00:00:08:00						X1				VD	PONT
00:00:10:00				C			X				
00:00:12:00								X			
00:00:14:00						V		X			
00:00:15.000	2	RETRO INT	0.240								
00:00:15.000	2	PAREBRISSE	0.240								
00:00:15.620	3	PAREBRISSE	0.480					X1		M	
00:00:16.220	x										
00:00:16.300	x										
00:00:16.340	x										
00:00:16.560	x										
00:00:16.580	x										
00:00:16.620	4	PAREBRISSE	0.140								
00:00:16.620	x										

Tableau II.17 : Extrait de grille d'observation obtenue suite au dépouillement manuel.

Les colonnes A à D sont fournies directement par le logiciel EYENAL. Pour chaque fixation, on dispose de l'instant de début, du numéro d'ordre, du lieu de la fixation en termes de zone, et de la durée.

Les colonnes suivantes sont insérées manuellement. Il s'agit donc de données d'observation qui décrivent l'environnement autoroutier : nombre de voies, voitures en interaction et environnement. Le codage retenu est le suivant :

- Différentes voies : Dans le cas de la figure II.17, il s'agit d'une autoroute à 4 voies, F1 étant la voie de droite et F4 la voie de gauche. Les colonnes intermédiaires sont utilisées pour matérialiser les changements de voie.
- Voitures en interaction : A chaque changement de voie du véhicule sujet (X), on note X dans la voie correspondante. Si X est précédé d'un autre véhicule à moins de 100 mètres, on note X1. A chaque passage d'un véhicule à côté de X, on note V si c'est une voiture, C si c'est un camion et M si c'est une moto. On ajoute un D (Double) si ce véhicule est en train de doubler X (VD, CD, MD).
- Environnement : Des ponts sont utilisés comme repères pour lancer et stopper l'enregistrement des mouvements oculaires. Leur succession permet également de jaloner le déroulement de l'expérimentation.

### II.2.2.3 Evaluation de l'oculomètre et du logiciel de dépouillement

Une expérimentation exploratoire a été réalisée, avec un objectif double :

- évaluer les performances de l'ETS et des outils associés en situation réelle d'utilisation ;
- caractériser le comportement oculomoteur des conducteurs orienté sur les équipements intérieurs, en relation avec leur style de conduite : économique ou sportif.

21 conducteurs ont pris part à l'expérimentation, sélectionnés sur la base de questionnaires destinés à évaluer leur style de conduite. Le trajet à effectuer consistait en un aller-retour Vélizy-Chartres par l'autoroute, trajet représentant une distance totale de 160 km. L'enregistrement des mouvements oculaires était organisé en périodes d'environ 30 minutes, 2 à l'aller et 2 au retour.

Seuls les résultats concernant le premier objectif sont maintenant détaillés, les autres l'étant ultérieurement au paragraphe III.2.

### II.2.2.3.1 Evaluation de la qualité des acquisitions selon trois critères

Le logiciel EYENAL fournit une durée appelée "segment loss time" par session d'acquisition. Nous avons calculé la proportion de cette durée par rapport à la durée totale d'acquisition (cf. tableau II.18). Cette durée représente les moments où l'ETS ne repère plus la pupille.

Nous avons également décrit les répartitions des fixations sur chaque zone d'intérêt pour chaque sujet afin de repérer les sujets pour lesquels les répartitions sont atypiques (exemple : si un sujet ne regarde jamais sa vitesse, on considère que ce n'est pas son comportement réel, c'est une erreur d'acquisition).

Enfin, pour chaque sujet et selon la partie du parcours, la qualité des enregistrements vidéo est variable. Des parasites sont apparus sur certaines bandes vidéo suite notamment à une alerte lors de la session d'enregistrement ("A bus trap occurred").

Le tableau II.18 fournit une synthèse sur la qualité des enregistrements selon les trois critères ci-dessus.

	N° sujet	Pourcentage de "loss time"				Dif inter sur nb fixations	Parties vidéo mauvaises
		Partie 1	Partie 2	Partie 3	Partie 4		
S	2	/	50,87	63,06	46,30	*	Ok
P	5	11,17	23,33	16,34	16,35	*	Ok
O	12	/	39,82	24,49	/		Parties 3, 4
R	16	23,96	44,55	52,13	/		Partie 4
T	22	16,93	26,89	18,40	24,80	+	Ok
I	31	/	39,71	28,68	25,31	+	Parties 2, 3, 4
F	35	47,73	/	32,08	41,51	*	Parties 3, 4
S	40	19,34	/	17,75	48,05		Parties 3, 4
	41	10,89	28,07	43,57	52,46	*	Ok
E	7	32,30	12,59	/	22,51		Ok
C	8	69,61	43,42	61,31	44,23		Ok
O	9	36,45	44,66	/	/	*	Ok
N	13	28,45	24,88	19,69	22,38	*	Ok
O	14	8,22	6,53	7,87	/		Ok
M	18	19,52	55,20	36,34	21,30	*	Pas de vidéo
I	19	/	14,35	13,48	21,20	*	Parties 3, 4
Q	20	8,48	16,74	8,90	9,01	*	Ok
U	21	/	13,89	52,53	45,31		Parties 1, 2, 3, 4
E	23	19,97	16,85	32,50	15,50	*	Ok
S	37	/	/	16,45	5,86		Ok
	46	32,98	18,58	13,02	20,50		Ok

Tableau II.18 : Synthèse de la qualité des acquisitions suivant trois critères.

Dif inter sur nb fixations = différences interindividuelles sur la répartition des fixations :

\* : sujets n'ayant pas fait l'objet de remarques lors de la description des différences interindividuelles concernant le nombre de fixations par zone et faisant partie de l'échantillon utilisé pour les tests statistiques ;

+ : sujets faisant partie de l'échantillon utilisé pour les tests statistiques mais ayant fait l'objet de remarques interindividuelles.

Les sujets 5 et 22 pour les sportifs et 13 et 20 pour les économiques sont considérés comme les plus représentatifs de leur groupe d'appartenance et comme les plus valides au niveau des données, c'est pourquoi ils ont été choisis pour un dépouillement minutieux de leurs enregistrements vidéo.

### II.2.2.3.2 Estimation de la durée d'acquisition et de traitement pour un conducteur

Concernant la phase d'acquisition :

- Calibration : 1/2 heure en général. Cette durée comprend la définition des points de calibration, la correction de l'effet de parallaxe, et les calibrations successives pour améliorer la qualité de la calibration si nécessaire. Cette durée dépend des conditions de réglage : lorsque les yeux sont trop sensibles à la lumière, les sujets ont tendance à cligner des yeux ce qui ne favorise pas les réglages ; lorsque des parasites du même type que ceux apparus sur les bandes vidéo brouillent l'image œil, la numérisation de l'oeil et le repérage des contours des reflets sont laborieux. Les durées de calibration ont oscillé entre 20 minutes et 1 heure 30 minutes.
- Acquisition des données : trajet de 1 heure environ (dépend de la vitesse adoptée par le conducteur).
- Post-entretien : de 1/4 d'heure à 3/4 d'heure.

Concernant la phase de dépouillement :

- Définition des zones d'intérêt : 1 heure.
- Transfert des données sur disquettes et conversion en données lisibles par EYENAL : 30 minutes. Traitement des données dans EYENAL : 4 heures. Ce traitement comprend la définition des zones d'intérêt, le repérage des intervalles temporels à traiter, la création d'un fichier "sujet.FIX" qui repère les fixations, d'un fichier "sujet.FSQ" qui associe les fixations à une zone d'intérêt particulière, d'un SCAN qui trace les fixations sur les zones d'intérêt.
- Transfert des données "sujet.FIX" dans EXCEL (4 fichiers car 4 sessions d'acquisition par sujet) dans les grilles d'observation : 1 heure. Visualisation de la vidéo : 7 heures.
- Traitement des données dans Excel : 16 heures.

Le tableau II.19 ci-après récapitule la durée des principales opérations nécessaires au recueil de l'activité oculaire d'un seul conducteur (trajet d'environ 1 heure). Le total représente 4 jours de travail.

Opérations réalisées :	Durées :
Expérimentation	3 heures
Définition des zones d'intérêt	1 heure
Transfert et conversion des fichiers de données	30 minutes
Traitement dans Eyenal	4 heures
Création grilles d'observation et visualisation vidéo	8 heures
Traitement des données dans Excel	16 heures
<b>Total :</b>	32 heures et 30 minutes

Tableau II.19 : Estimation des temps nécessaires à la réalisation d'une expérimentation et à son dépouillement.

### II.2.2.3.3 Synthèse critique concernant la mise en oeuvre de l'ETS

L'oculomètre ETS souffre encore à l'heure actuelle de quelques défauts pénalisants vis-à-vis de l'objectif final de l'étude : durée d'acquisition continue limitée à 30 minutes environ, pourcentages de pertes importants, et "plantages" occasionnels. Aussi, nous ne pouvons à l'heure actuelle quantifier ni qualifier les performances réelles de l'outil. ASL a été sollicité sur ces problèmes purement techniques. L'ETS s'est par ailleurs avéré facile à utiliser.

Le logiciel EYENAL s'est avéré assez peu adapté : manque de souplesse et de convivialité et, surtout, aucune aide prévue pour le dépouillement manuel des enregistrements vidéo. Actuellement, un travail important est réalisé afin d'adapter les logiciels développés au LAMIH pour le simulateur au contexte de la route réelle. Il s'agit principalement d'adapter le module de filtrage au format des données retournées par l'ETS et à transformer le module de lancer de rayon en un véritable système d'aide au dépouillement (dépouillement semi-automatique).

## II.3 Méthode MAP

### II.3.1 Présentation générale

La Méthode d'Apprentissage Progressif a été développée à la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques (DRAS), puis à la Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile (DRIA) de PSA Peugeot Citroën pour être mise en œuvre en conduite réelle puis, dans le cadre de cette étude, en conduite simulée. Elle est née de l'objectif de détecter les défaillances du conducteur (inattention ou baisse de vigilance par exemple) à l'aide d'indices "mécaniques" seuls (volant, pédales) tout en tenant compte des variabilités inter- et intra-individuelles des conducteurs. L'idée est alors de détecter les évolutions de l'activité de conduite au cours du temps, sans hypothèse a priori sur l'origine ni la forme de ces évolutions. Il s'agit ensuite de sélectionner, parmi les évolutions mises en évidence, celles liées à une défaillance du conducteur /Peltier, 93//Dillies-Peltier, 98/. Cette méthode s'inspire des algorithmes de reconnaissance des formes floue. En voici brièvement le principe.

L'activité du conducteur sur le véhicule se traduit par des actions sur les commandes de celui-ci. Ces actions se reflètent sur des signaux mesurables (mouvements du volant par exemple). MAP analyse ces signaux en procédant en quatre étapes :

- Il calcule, en continu, sur ces signaux, des paramètres statistiques reflétant leurs évolutions au cours du temps. Ces paramètres sont rassemblés dans un vecteur appelé vecteur forme.
- Au début du trajet, il mémorise la valeur de ces paramètres statistiques, afin de déterminer une "classe initiale", caractérisant un état de référence. Cette mémorisation (ou apprentissage), est réalisée à l'aide d'un réseau de neurones.
- Après cette phase d'apprentissage, toute nouvelle mesure de l'activité de conduite, c'est-à-dire tout nouveau vecteur forme calculé, est comparé à la conduite de référence, matérialisée par les vecteurs formes mémorisés. Le résultat de cette comparaison, réalisée par le réseau de neurones, est une valeur comprise entre 0 et 1. Elle caractérise la ressemblance entre la conduite instantanée mesurée et la conduite mémorisée. Elle vaut 1 si les deux conduites sont similaires, et décroît vers 0 à mesure qu'elles se différencient. Le calcul en continu de cet indicateur se traduit par un signal temporel dont les évolutions traduisent les évolutions de la conduite au cours du temps, par rapport à la conduite de référence. Un exemple de ce signal, obtenu sur des données réelles acquises sur autoroute, est donné figure II.20.
- Un passage par 0 de cet indicateur est interprété comme un changement de la conduite par rapport à la référence. Si les vecteurs formes correspondants vérifient certains critères de similarité, ils sont mémorisés à leur tour afin de définir une nouvelle classe pouvant caractériser un nouvel état du conducteur. On obtient alors un nouvel indicateur (indicateur secondaire) qui, à son tour, est calculé en continu. On obtient ainsi autant d'indicateurs qu'il y a de conduites mémorisées au cours d'un trajet (cf. figure II.20).

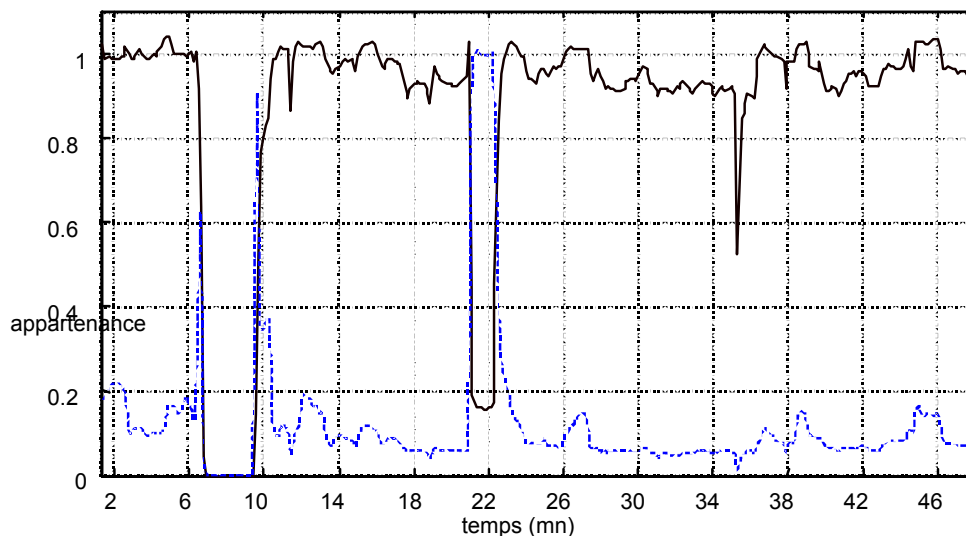


Figure II.20 : Exemple de signal de référence (trait plein) et de signal secondaire (trait pointillé).

L'analyse a alors deux objectifs. Il s'agit d'une part de comprendre les évolutions mises en évidence par cet indicateur, à l'aide de quatre éléments : mesures issues de l'oculométrie, images vidéo enregistrées, verbalisations éventuelles du conducteur, pendant le trajet et a posteriori, et configuration du parcours. D'autre part, elle consiste à régler les paramètres de l'algorithme afin que les évolutions mises en évidence soient interprétables en termes de changements de l'environnement ou de l'état du conducteur.

La validation expérimentale de la méthode a nécessité deux étapes successives, ayant des objectifs différents mais complémentaires. Dans un premier temps, nous avons cherché à valider les paramètres employés pour décrire l'activité du conducteur. Les critères de validation utilisés évaluaient la capacité de ces paramètres à signaler les évolutions marquantes de l'activité du conducteur, tout en permettant une distinction la plus claire possible entre celles provenant d'un changement de l'environnement de conduite et celles consécutives à une altération de l'attention du conducteur. Un compromis devait être trouvé entre la nécessité de ne signaler que les évolutions significatives (travaux, échangeur, inattention, somnolence) et celle de n'en masquer aucune qui soit de nature pathologique.

Après détermination de ces critères, une seconde campagne expérimentale a été mise en place afin de les valider en temps réel dans un véhicule. Un système embarqué complet, réalisant l'acquisition, le traitement des données brutes, l'apprentissage des modes de conduite successifs du conducteur, le calcul et la visualisation des signaux d'appartenance et la détection des baisses de vigilance a été développé et intégré dans un véhicule réel.

### II.3.2 Dispositifs développés pour les expérimentations sur route

Plusieurs systèmes successifs ont été développés pour réaliser des expérimentations sur route réelle. Le premier était constitué de la combinaison d'une centrale d'acquisition archivant des grandeurs mesurées sur le véhicule avec des caméras vidéo filmant le conducteur et l'environnement. Ce système, qui ne permettait d'effectuer que des traitements a posteriori, a été utilisé afin de valider les paramètres employés pour décrire l'activité du conducteur.

Le dernier système en date est un dispositif autonome intégrant l'ensemble de la chaîne de mesure, de diagnostic et d'information du conducteur (figure II.21).

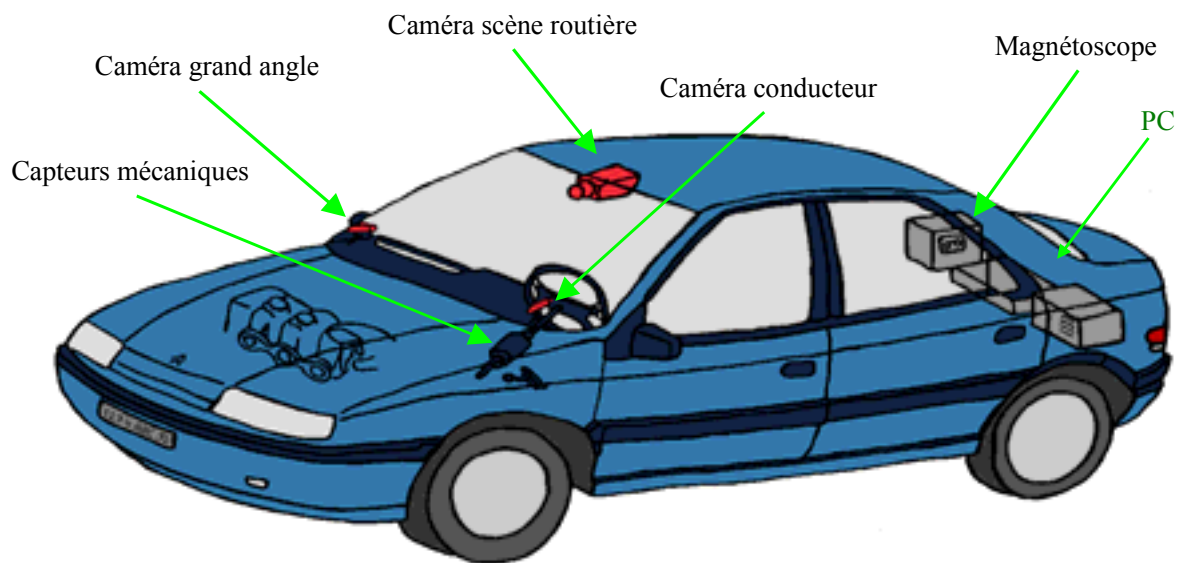


Figure II.21 : Architecture classique d'un système MAP.

Le véhicule est également équipé de caméras filmant le conducteur et la scène routière afin de contrôler a posteriori le bon fonctionnement du dispositif en confrontant le diagnostic automatique aux interprétations issues de l'étude fine et systématique du comportement du conducteur, observé au moyen d'enregistrements vidéo.

### II.3.3 Dispositifs développés pour les expérimentations en simulateur

L'architecture du système "véhicule réel" a été reprise en simulateur en exploitant tout naturellement les avantages de ce contexte expérimental :

- les grandeurs physiques mesurées au moyens de capteurs sur le véhicule réel ont été obtenues grâce à des capteurs "logiciels" : un module spécifique de l'application de simulation transmet au PC MAP par l'intermédiaire d'un réseau Ethernet les valeurs calculées par le modèle dynamique de véhicule de ces grandeurs,
- l'ensemble des matériels de calcul et d'archivage a été implanté dans la salle de suivi d'essais du simulateur de conduite, de façon à permettre un contrôle continu du fonctionnement du système pendant toute la durée de l'expérimentation sans induire la moindre perturbation pour le conducteur.

## II.4 Synthèse des acquis concernant les moyens expérimentaux

Le simulateur SHERPA a été dupliqué à l'Université de Valenciennes. Il est opérationnel depuis novembre 1998 dans le bâtiment du C3T (Centre Technologique en Transports Terrestres). Les expérimentations finales de la convention faisant l'objet de ce contrat se sont déroulées de février à mai 1999 et ont montré une fiabilité globale très satisfaisante.

Depuis septembre 1999, un travail important de mise à jour matérielle et logicielle a été entamé. Cette mise à jour, planifiée de longue date, va permettre de mettre SHERPA-Valenciennes au niveau de SHERPA-Bièèvres qui sert de support aux divers développements.

L'oculomètre ASL 4000 du LAMIH a été intégré dans SHERPA. Un système de traitement automatique des enregistrements baptisé SATMOS a été développé. Ce système, sans équivalent sur le plan international, offre un gain de 20 au niveau des temps de dépouillement. Sans un tel système automatisé, l'exploitation complète des enregistrements oculométriques réalisés lors des dernières expérimentations ne serait pas envisageable.

En ce qui concerne les mesures sur route réelle, PSA a fait l'acquisition d'un oculomètre ETS, le seul capteur du marché réellement adapté pour un tel usage. Les quelques défauts matériels relevés lors des pré-expérimentations sont en passe d'être résolus. Par contre, le logiciel de dépouillement fourni avec le capteur - EYENAL - s'avère inadapté compte tenu des volumes de données à traiter.

Concernant le système MAP, des travaux très importants de mise au point ont été réalisés, débouchant sur un système opérationnel tant sur route réelle qu'en simulateur.

Les divers équipements, outils logiciels et méthodes associées ont été mis au point simultanément par les équipes de PSA et du LAMIH. Le chapitre suivant présente des expérimentations préliminaires réalisées avec des "sous-ensembles", en préparation des expérimentations finales mettant en oeuvre la totalité du dispositif.



### III. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS PRELIMINAIRES

#### III.1 Expérimentation réalisée avec SHERPA-Bièvres

##### III.1.1 Introduction

Cette première étude s'attache à la détection de l'évolution du comportement de conduite du conducteur et plus précisément à ses dégradations (baisse de vigilance, inattention) lors d'un trajet monotone de longue durée sur autoroute. Elle passe par la mise en place d'une méthode d'analyse statistique permettant de :

- mettre en évidence les variables les plus discriminantes quant à l'état de dégradation de comportement du conducteur, c'est-à-dire sensibles au facteur temps, sachant l'importance dans la conduite du facteur environnement (présence de différents types de virages et de lignes droites) et du facteur individu (les conducteurs conduisent plus ou moins vite, de manière plus ou moins souple, ...);
- montrer comment les variables les plus discriminantes sont liées entre elles afin de mieux connaître le comportement du conducteur (modèle comportemental).

Compte tenu de l'aspect hétérogène des variables temporelles et des objectifs à respecter pour leur analyse, une approche purement exploratoire et multivariable, dans un premier temps tout au moins, semble bien adaptée. Parmi les différentes méthodes pouvant être associées à cette étude, celle que nous avons retenue est l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) /Escofier & Pagès, 88/ car les relations entre les variables temporelles peuvent être non linéaires et locales /Loslever et al., 98/. L'ACM est certes une méthode descriptive mais elle est peu réductrice d'information et surtout elle n'est basée sur aucune hypothèse probabiliste. L'ACM fait apparaître les phénomènes les plus marquants en mettant en évidence les relations qui existent entre les différentes variables utilisées, en déterminant les variables les plus discriminantes, en identifiant des classes de comportement au travers des variables pour chaque sujet et en comparant d'un sujet à l'autre les différences de comportements.

##### III.1.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental de cette étude se compose de quatre phases successives. Les trois premières visent à permettre au sujet d'acquérir la maîtrise de la conduite en simulateur, la quatrième et dernière correspond au test réalisé pour notre étude, à savoir un trajet autoroutier monotone de longue durée. Au total, au cours de ces tests chaque sujet a parcouru 250 kilomètres d'autoroute pour environ 2H30 de conduite.

La quatrième et dernière phase du protocole est constituée d'un trajet autoroutier de 160 kilomètres correspondant à une durée de conduite d'environ 70 minutes. Pour garantir la monotonie de ce trajet, l'environnement routier a été volontairement appauvri (absence de trafic, signalisation minimale, peu de végétation, ...).

Le circuit se compose d'une portion d'autoroute réaliste d'environ 20 kilomètres parcourue huit fois. Même si la distance totale semble faible pour ce type d'étude, le fait d'avoir déjà réalisé environ une heure de conduite ( $\approx 100$  km) sur des circuits très exigeants pour le conducteur (rétrécissements de la chaussée, virages serrés) et de conduire ensuite dans un environnement simulé monotone sans trafic amplifient d'autant plus l'apparition de baisses de vigilance et d'attention. En effet, la conduite sur simulateur est bien plus éprouvante que la conduite réelle /Tarrière et al., 88//Planque et al., 91//Lechner, 94/.

Les huit portions du circuit elles-mêmes composées de quatorze tronçons se distinguent les unes par rapport aux autres par la présence ou non d'échangeurs, d'une aire de service avec une pompe à essence et d'un virage à droite ou à gauche relativement serré pour ce type de réseau (rayon de courbure = 800 m).

Les consignes données aux sujets pour réaliser ce test sont de conserver le véhicule dans la voie de droite et de "respecter" le code de la route (en particulier les limitations de vitesse) comme ils le font dans la réalité. Les sujets ont connaissance du kilométrage à parcourir et peuvent alors se situer dans le circuit en consultant l'horloge du tableau de bord (1h20 à 120 km/h de moyenne).

### III.1.3 Résultats de l'approche exploratoire

#### Variables utilisées

Les sept variables utilisées sont :

- trois variables relatives à l'activité posturale du conducteur (positions longitudinale, latérale et verticale de la tête) ;
- une variable relative aux actions du conducteur sur les commandes véhicule (angle volant) ;
- trois variables relatives au comportement cinématique du véhicule dans l'environnement (vitesse du véhicule, position latérale du véhicule sur la chaussée, "erreur de cap" du véhicule).

Certaines variables proposées au début de l'étude n'ont pas été retenues dans cette première analyse. En effet, plusieurs analyses préliminaires ont permis de mettre en évidence qu'en l'absence de trafic et de rétrécissements de chaussée, les trois distances faisant partie de la définition des exigences de la tâche de guidage (distance longitudinale avant sortie de route DLON, distance latérale avant sortie de route DLAT, distance de visibilité DVIS), extrêmement liées à la géométrie du circuit et aux obstacles situés sur la chaussée, masquaient fortement l'influence du temps sans apporter d'information complémentaire. Elles ont donc été supprimées de cette première analyse.

#### Identification des variables

Elles correspondent à des indicateurs statistiques (moyenne et écart-type) calculés tronçon par tronçon pour les signaux de base. La plage de variation de chaque indicateur est alors découpée en 3 modalités spatiales floues afin de pouvoir faire apparaître d'éventuelles relations non linéaires.

Chaque variable est désignée par un symbole trilitère : la première lettre désigne l'indicateur statistique ("M" pour moyenne et "E" pour écart-type), la seconde précise la composante du signal (cf. tableau III.1 ci-après), la troisième se réfère à la modalité ("p" pour petit, "m" pour moyen, "g" pour grand). Ainsi par exemple, EVp correspond à la modalité spatiale petite de l'écart-type de la vitesse.

	Notation
<i>Position latérale du véhicule en mètres (YCURV)</i>	L
<i>Vitesse du véhicule en mètres par seconde (V)</i>	V
<i>Angle au volant en degrés (A)</i>	A
<i>Erreur de cap en degrés (EC)</i>	C
<i>Position transversale de la tête (Tx)</i>	X
<i>Position latérale de la tête (Ty)</i>	Y
<i>Position verticale de la tête (Tz)</i>	Z

Tableau III.1 : Notation des composantes du signal analysé.

### ACM du sujet moyen sur les 112 tronçons /Todoskoff, 99a/

Le tableau représentant le sujet moyen est obtenu en calculant tronçon par tronçon la moyenne et l'écart type sur les 10 sujets des valeurs d'appartenance aux 3 modalités spatiales (ML, EL, MV, EV, MA, EA, MX, EX, MY, EY, MZ, EZ). On obtient ainsi un tableau de 112 lignes (unités statistiques = tronçons) et de 36 colonnes (modalités).

Dans cette analyse le facteur temps apparaît clairement sur l'axe 1. Les résultats obtenus corroborent en grande partie ceux de la littérature. Ainsi, l'influence du temps se manifeste par une augmentation progressive des indicateurs de dispersion (sauf la vitesse et l'angle au volant) et un tassement du conducteur dans son siège. Au niveau comportemental, la posture "avachie" ainsi que l'augmentation des mouvements du corps sont des signes caractéristiques de la "fatigue" au volant /O'Hanlon & Kelley, 77//Germain & Blanchet, 95/. L'augmentation de la dispersion de la position latérale du véhicule va également dans le sens d'une dégradation du comportement du conducteur et notamment d'une baisse de vigilance /Cointot et al., 93//Yamamoto et al., 95/. Concernant la vitesse, le résultat fait état d'une augmentation entre le début et la fin du circuit. Ceci peut s'expliquer par le fait que, empreint de lassitude, le conducteur veut terminer le plus vite possible son trajet. Ce phénomène observé en simulateur a également été mis en évidence en conduite réelle par O'Hanlon & Kelley /77/. Par contre, pour l'écart-type de la vitesse aucun résultat significatif n'est indiqué dans cette analyse contrairement à de nombreuses études qui font état d'une augmentation de la variabilité /O'Hanlon & Kelley, 77//Cointot et al., 93/. L'absence de trafic et de respect d'une consigne de vitesse expliquent certainement ce fait, le conducteur n'ayant pas besoin de réguler sa vitesse par rapport à d'autres véhicules ou par rapport à une vitesse imposée. L'angle au volant, au travers de son écart-type et de sa moyenne ne semble pas non plus être significatif d'une évolution temporelle n'intervenant que sur l'axe 2. La majorité des auteurs indique cependant qu'une baisse de vigilance se manifeste par une baisse de contrôle du véhicule se traduisant par des ajustements de la trajectoire moins nombreux et plus amples /O'Hanlon & Kelley, 77//Cointot et al., 93/. En fait, il est vraisemblable que pour ces variables le facteur tronçon caractérisé par l'axe 2 de l'ACM prédomine sur le facteur temporel et masque ainsi les évolutions temporelles de celles-ci.

Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une autre analyse pour laquelle l'influence du facteur tronçon devra être affaiblie. Pour cela, l'unité statistique choisie est le tour.

### ACM des 10 sujets sur les 8 tours

Le tableau à analyser est obtenu en moyennant les valeurs d'appartenance pour chaque sujet et pour chacune des 12 variables (idem analyse précédente) sur les tronçons d'un tour donné (14 tronçons). Ce tableau se compose ainsi de 80 lignes (8 tours x 10 sujets) et de 36 colonnes (modalités). Notons que pour l'angle au volant le calcul a été réalisé à partir de la valeur absolue de ce signal afin d'homogénéiser les tours entre eux. En effet, les tours se distinguent les uns par rapport aux autres par la courbure à droite (angle au volant négatif) ou à gauche (angle au volant positif) d'un virage serré. Un nouveau découpage spatial en trois modalités ("p", "m" et "g") sur l'angle au volant a également dû être effectué.

Les résultats de cette analyse viennent compléter ceux de la précédente. En réduisant l'influence des tronçons en prenant le tour comme unité statistique, l'écart-type de l'angle au volant évolue, cette fois-ci, tour après tour comme les écarts-types des positions de la tête et de la position latérale du véhicule sur la chaussée. Cette évolution temporelle se manifeste par une augmentation progressive de ces indicateurs de dispersion et est liée notamment à une dégradation du

comportement de conduite des conducteurs (baisse de vigilance, inattention) tours après tours /O'Hanlon & Kelley, 77//Cointot et al., 93//Germain & Blanchet, 95//Yamamoto et al., 95/.

Le caractère “ sous-vireur ” /Pierre & Quilici, 80/ des véhicules automobiles à traction avant est également mis en évidence par la relation étroite liant l'angle au volant et la vitesse du véhicule. En effet, l'augmentation de la vitesse se traduit par l'emploi d'un angle au volant plus important afin de conserver une trajectoire adaptée et ce d'autant plus lorsqu'il s'agit d'un virage serré.

#### Discussion des résultats obtenus par les deux ACM

L'influence très marquée des facteurs individu et tronçon dans les résultats nous a conduits à définir d'autres analyses en masquant plus ou moins ces phénomènes afin de faire ressortir le facteur temporel constituant l'objectif essentiel de notre étude. Toutefois, les résultats obtenus en masquant le facteur individu (analyse du sujet moyen) peuvent être discutables. En effet, au vu des différences inter-individuelles importantes, le comportement du sujet moyen peut très bien ne correspondre à aucun des sujets. L'analyse par tour en masquant cette fois-ci l'influence du facteur tronçon se heurte également à la validation des résultats à l'ensemble des sujets. L'évolution temporelle révélée sur certaines variables n'est effectivement visible que sur certains sujets qui peuvent à eux seuls en être l'origine. Il est donc nécessaire de vérifier ces résultats par l'intermédiaire d'une approche confirmatoire et d'envisager une généralisation à une population de conducteurs de même caractéristiques que la population expérimentale.

### **III.1.4 Résultats de l'analyse confirmatoire**

#### Choix du test

La taille de l'échantillon (10 conducteurs) étant relativement faible et la distribution des écarts-types risquant de ne pas suivre une distribution gaussienne, les tests non paramétriques sont préférés. Un test Fishérien étudiant la symétrie de la distribution d'une différence est retenu /Lebart et al., 82/ en prenant comme unité statistique non plus le tronçon mais le tour.

#### Caractérisation des variables

La caractérisation des variables s'identifie à celle de la dernière analyse exploratoire. Elle est obtenue en moyennant pour chaque sujet et pour chacune des 12 variables retenues (ML, EL, MV, EV, MA, EA, MX, EX, MY, EY, MZ, EZ), les tronçons d'un tour donné. De même, pour l'angle au volant, ce calcul s'appuie sur la valeur absolue de ce signal.

Toutefois, dans l'optique d'évaluer l'influence du temps, les unités temporelles retenues correspondent uniquement aux premiers et derniers tours des 10 conducteurs. Le tableau de données à analyser se compose ainsi de 20 lignes (2 tours x 10 sujets) et de 12 colonnes (12 variables de l'analyse).

#### Résultats de l'analyse confirmatoire

Au niveau des variables de l'analyse relatives aux moyennes arithmétiques, la procédure de test montre qu'entre le premier et le dernier tour, la vitesse du véhicule (MV) augmente d'environ 7 km/h, la position latérale du véhicule sur la chaussée (ML) se rapproche de la bande d'arrêt d'urgence d'environ 10 cm, la position de la tête s'éloigne du pare-brise (MX) d'environ 6 mm et baisse (MZ) également d'environ 6 mm. Quant aux variables de l'analyse relatives aux écarts-types, la procédure montre que, excepté pour la vitesse V, les dispersions vont en augmentant.

Ces résultats confirment donc ceux déjà mis en évidence par l'approche exploratoire. Toutefois, ils font apparaître également un autre phénomène non encore mis en évidence par les différentes ACM. En effet, la position latérale du véhicule évolue entre le premier tour et le dernier tour en se décalant à droite vers la bande d'arrêt d'urgence. Il est vraisemblable que ce phénomène non visible dans l'approche exploratoire ait été masqué entre autres par le facteur tronçon dans les deux premières ACM et par le facteur individu dans la dernière ACM.

L'hypothèse avancée pour expliquer cette évolution de la position latérale du véhicule sur la chaussée vient de la modification de l'activité visuelle du conducteur au cours du temps. Selon Kaluger et Smith /70/ (cités dans /Neboit, 80/), les sujets " fatigués " fixent les bordures de voie proches du véhicule plus fréquemment et fixent moins souvent le point d'expansion de la route. La trajectoire du véhicule étant " attirée " par les repères observés, la conséquence en est une modification de la position latérale dans la voie.

### **III.1.5 Conclusion**

L'étude des évolutions temporelles du comportement du conducteur lors d'une situation de conduite monotone de longue durée sur autoroute a été réalisée au moyen de deux approches complémentaires.

La première, l'approche exploratoire, basée sur l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a permis de mettre en évidence les phénomènes les plus marquants traduits par les différentes variables utilisées. L'aspect multivariable de l'ACM a permis également de déterminer les variables les plus discriminantes, d'identifier des classes de comportement et de comparer les différences de comportement d'un sujet à un autre. L'avantage de cette approche réside principalement dans la prise en compte de plusieurs facteurs (temps, géométrie de la route, individu) et variables dans l'analyse pouvant expliquer des modifications de comportement.

La seconde, l'approche confirmatoire, basée sur une méthode de test (test Fishérien étudiant la symétrie de la distribution) a permis de valider l'analyse exploratoire.

Les résultats obtenus dans cette étude sont incontestablement très riches. En effet, il a été mis en évidence que le comportement des conducteurs évolue significativement en se dégradant progressivement tout au long du trajet. Cette altération du comportement se manifeste notamment par l'apparition de phénomènes caractéristiques confirmés dans la littérature :

- des mouvements corporels du conducteur plus importants et plus fréquents ;
- des ajustements de la trajectoire du véhicule plus amples entraînant une augmentation de l'amplitude des écarts latéraux du véhicule sur la chaussée ;
- une posture " avachie " du conducteur.

La baisse de vigilance des conducteurs (" fatigue ", somnolence, endormissement, ...) constitue une hypothèse pour expliquer ces dégradations. Toutefois, la diminution de l'attention des conducteurs (distraction, attention flottante, baisse de concentration, ...) peut également être en cause.

Cette étude a fait apparaître également une évolution du comportement de conduite lors du trajet autoroutier sur deux points complémentaires : premièrement au niveau de la vitesse adoptée par les conducteurs, puisque ceux-ci ont tendance à accélérer progressivement au cours du trajet, et deuxièmement au niveau de la position latérale du véhicule sur la chaussée puisque celui-ci se rapproche progressivement de la bande d'arrêt d'urgence.

### III.2 Expérimentation réalisée sur route avec l'oculomètre ETS

Ce paragraphe présente les résultats de la première expérimentation réalisée par PSA avec l'oculomètre ETS (le bilan technique a été présenté au paragraphe II.2.2).

L'objectif était de caractériser le comportement oculomoteur des conducteurs orienté sur les équipements intérieurs, ceci en relation avec le style de conduite : économique ou sportif.

#### III.2.1 Hypothèse générale de travail

Le comportement oculomoteur des conducteurs diffère selon le style de conduite et l'environnement autoroutier.

Variables indépendantes :

- V.I.1 : style de conduite : style sportif et style économique ;
- V.I.2 : environnement autoroutier : nombre de voies, file occupée, véhicules en interaction.

Variables dépendantes :

- V.D.1 : fixations : durée, fréquence, zone de fixation ;
- V.D.2 : patterns oculomoteurs : nature des fixations les composant, configuration de l'environnement associé.

#### III.2.2 Protocole expérimental

##### • Population

21 sujets ont été sélectionnés sur la base de questionnaires destinés à évaluer le style de conduite (cf. tableau III.2 et annexe 1).

Style de conduite	Age	Amplitude	Moyenne
9 sportifs		25 à 47 ans	30,4 ans
12 économiques		23 à 61 ans	35,6 ans

Tableau III.2 : Principales caractéristiques de la population testée.

##### • Parcours

Il s'agissait de réaliser un aller-retour Vélizy-Chartres en passant par la N118, l'A10 et l'A11, soit environ 160 km. Les mouvements oculaires étaient enregistrés au cours de 4 périodes : 2 à l'aller et 2 au retour (tableau III.3). Il s'agit là d'une contrainte uniquement liée à l'oculomètre ETS.

ALLER		RETOUR	
	Nationale 2 voies		3 voies
	Autoroute 4 voies		
	-----		-----
	Départ acquisition	Départ acquisition	pont 1
			pont 2
			pont 3
			pont 4
			pont 5
	<b>PARTIE 1</b>	<b>PARTIE 3</b>	pont 6
			pont 7
			pont 8
			pont 9
			pont 10
	Fin acquisition		panneau transversal
	-----		-----
	Départ acquisition	Départ acquisition	péage
			pont 11
	4 voies		pont 12
			pont 13
			pont 14
			pont 15
	3 voies		panneau transversal
			-----
			Fin acquisition
			-----
			Départ acquisition
			péage
			4 voies
			panneau transversal
			pont 16
			pont 17
			pont 18
			pont 19
			pont 20
			pont 21
			pont 22
			pont 23
			pont 24
			panneau transversal
			Fin acquisition 2 voies
			-----
			sortie
			vers Bièvre
	Fin acquisition		-----
	sortie		

Tableau III.3 : Trajet effectué.

### • Déroulement

- 1) Accueil du sujet et présentation de l'expérimentation.
- 2) Ajustement de l'oculomètre aux caractéristiques propres du sujet et calibration.
- 3) Mesures en phase de roulage.
- 4) Post entretien : interview semi dirigé afin de recueillir à chaud des données subjectives sur :
  - ce qu'a vu le conducteur (événements, panneaux, aires, ponts, sorties, entrées...);
  - la pénibilité de l'expérience (échauffements);
  - le style de conduite adopté;
  - les changements dans le comportement habituel du conducteur.
- 5) Détermination des zones d'intérêt :

Sans la présence du sujet, après l'expérience, on note les coordonnées des zones d'intérêt obtenues via la caméra-scène réglée à la hauteur des yeux du conducteur. On définit ainsi 11 zones : scène-avant (via pare-brise), rétroviseur intérieur, combiné, température de l'eau, température de l'huile, compteur de vitesse, compte-tours, niveau d'essence, heure, statut de la boîte de vitesse, caméra-oeil.

- 6) Transfert sur disquette des 4 fichiers de données stockés par partie du parcours.

### III.2.3 Principaux résultats

#### III.2.3.1 Répartition des fixations sur les zones générales et sur les zones dans le combiné

Le logiciel Eyenal fournit le nombre total de fixations par session d'acquisition ainsi que le nombre de fixations sur les zones d'intérêt définies. Ces données nous permettent de calculer la proportion de fixations par zone d'intérêt (figures III.4 et III.5).

- Fixations à l'intérieur du combiné :

SPORT : Vitesse > Compte-tours > Heure > BVA > Essence > Eau > Huile

ECO : idem sauf inversion Eau > Essence

Vitesse : ECO > SPORT (T de Student significatif au seuil  $P=0,001$ )

Compte-tours : SPORT > ECO (T de Student significatif au seuil  $P=0,2$ )

Hors zone : SPORT > ECO (T de Student significatif au seuil  $P=0,001$ )

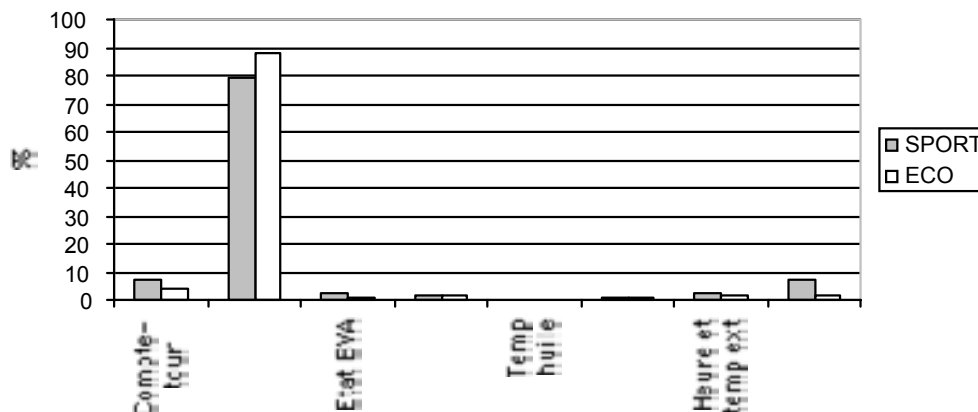


Figure III.4 : Répartition des fixations à l'intérieur du combiné.

- Fixations sur les zones générales :

Idem SPORT et ECO : Scène-avant > Rétroviseur > Combiné > Hors zone > Caméra

Scène-avant : ECO > SPORT (T de Student significatif au seuil  $P=0,02$ )

Hors zone : SPORT > ECO (T de Student significatif au seuil  $P=0,1$ )

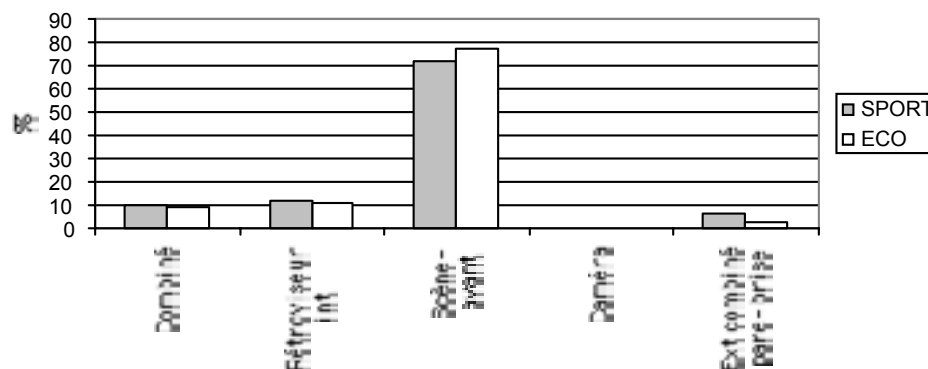


Figure III.5 : Répartition des fixations sur les zones générales.



### III.2.3.2 Durée moyenne des fixations

Le logiciel Eynal fournit la durée moyenne des fixations par zone d'intérêt et par session d'acquisition. Sur tout le parcours, par groupe de sujets et par zone d'intérêt, figure III.6 :

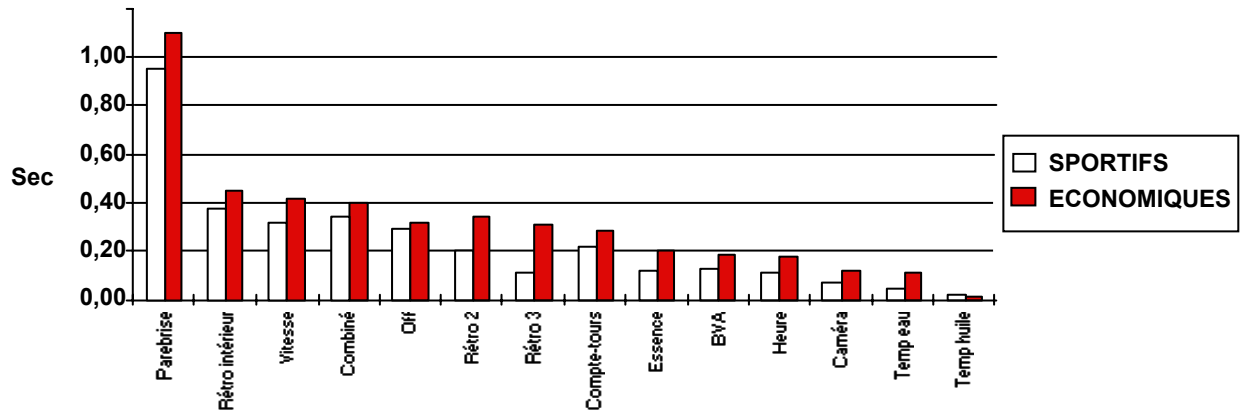


Figure III.6 : Durée moyenne des fixations sur tout le parcours, par groupe de sujets et par zone d'intérêt (Pare-brise = scène-avant).

Par groupe de sujets et par partie du parcours, toutes zones d'intérêt confondues, figure III.7 :

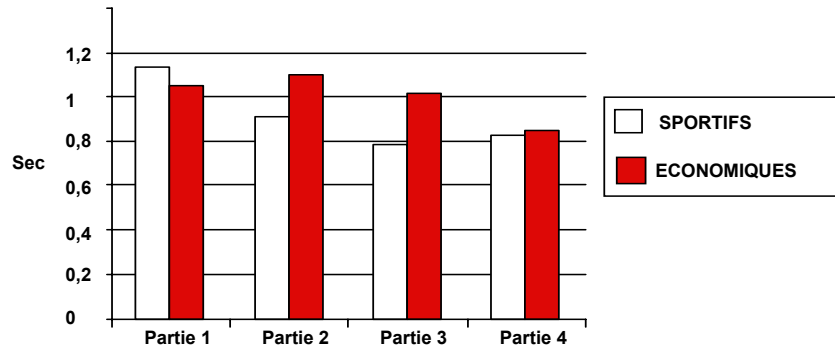


Figure III.7 : Durée moyenne des fixations par groupe de sujets et par partie du parcours, toutes zones d'intérêt confondues.

Idem SPORT et ECO : Scène-avant > Rétroviseur > Combiné ou Vitesse > Compte-tours (même tendance que la proportion de fixations).

Sur la partie 3 du parcours, toutes zones confondues : ECO > SPORT (T de Student significatif au seuil  $P=0,2$ ).

### III.2.3.3 Amplitude moyenne des interfixations

Le logiciel EYENAL nous fournit l'amplitude moyenne en degré des interfixations ou saccades (espace séparant deux fixations successives) par session d'acquisition.

Par groupe de sujets et par partie du parcours, figure III.8 :

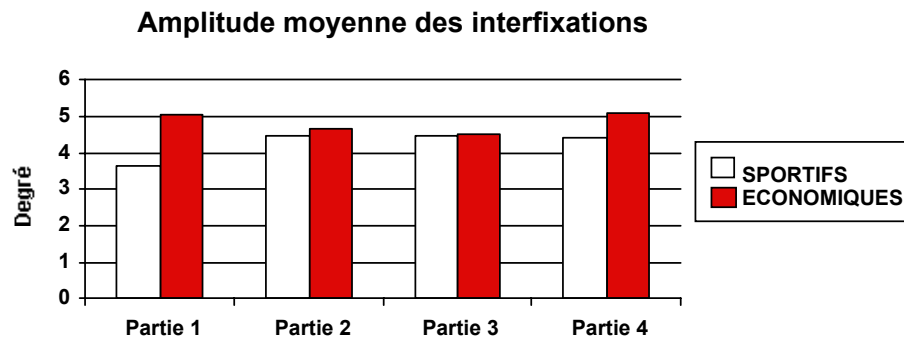


Figure III.8 : Amplitude moyenne des interfixations par groupe de sujets et par partie du parcours.

Parties 1 et 2, toutes zones confondues : ECO > SPORT (T de Student significatifs aux seuils  $P=0,05$  et  $P=0,2$ ).

### III.2.3.4 Fréquence moyenne des fixations

Le logiciel EYENAL fournit la fréquence moyenne des fixations par session d'acquisition.

Par groupe de sujets et par partie du parcours, figure III.9 :

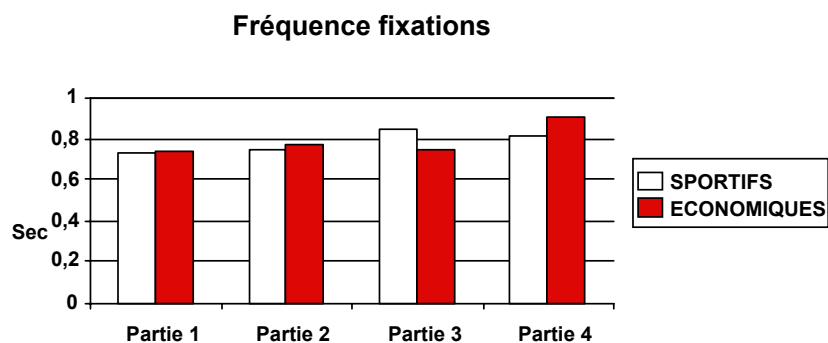


Figure III.9 : Fréquence moyenne des fixations par groupe de sujets et par partie du parcours.

Ensemble du parcours, toutes zones confondues : ECO = SPORT (aucune différence significative entre les deux groupes de sujets).

### III.2.3.5 Repérage des patterns oculomoteurs

La nature des patterns oculomoteurs associés aux configurations de l'environnement a été traitée à partir des données des grilles d'observation élaborées dans le tableur Excel : nous avons travaillé sur des patterns oculomoteurs constitués de 7 fixations. Nous avons caractérisé ces patterns oculomoteurs selon la nature des fixations qui les composent (fixations autres que sur la scène-avant).

Exemple de synoptique qui met en relation les déplacements sur les voies et les véhicules en interaction avec la nature des fixations, figure III.10 :

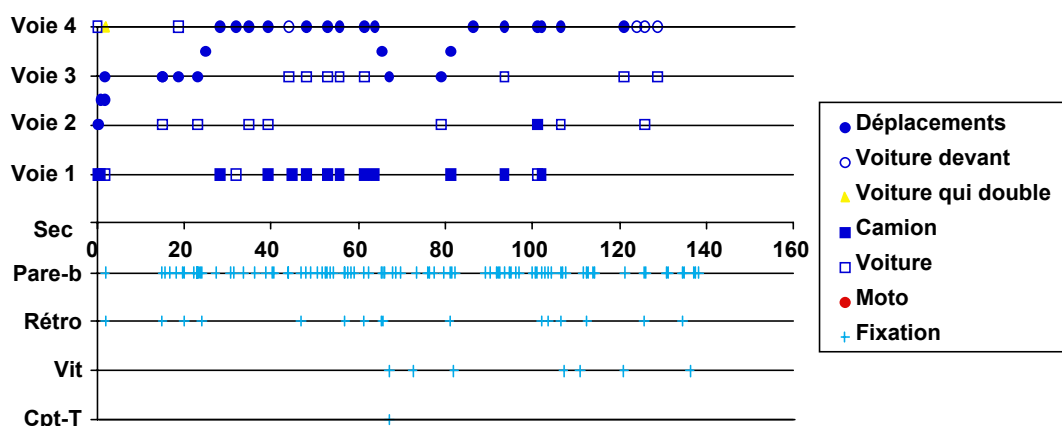


Figure III.10 : Mise en relation des déplacements sur les voies et des véhicules en interaction avec la nature des fixations.

Exemple de représentation des proportions de patterns oculomoteurs apparus selon les configurations de l'environnement associé, figure III.11 :

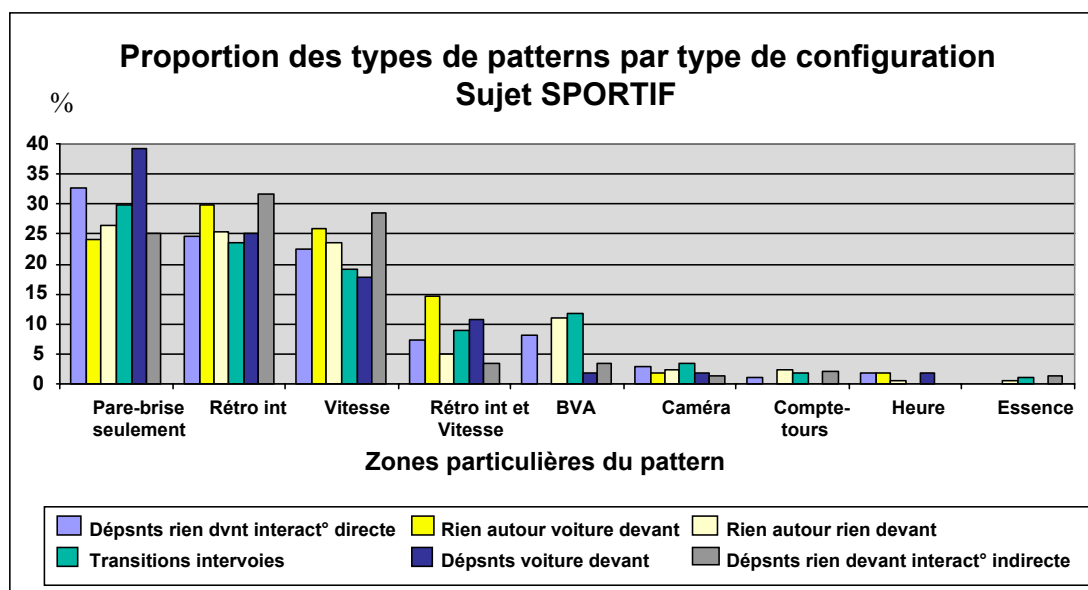


Figure III.11 : Exemple de représentation des proportions de patterns oculomoteurs apparus selon les configurations de l'environnement associé.

- Pare-brise seulement : le pattern oculomoteur est constitué de fixations exclusivement sur la scène-avant ou hors zone.
- Rétro-int : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur le rétroviseur intérieur et les autres fixations sont sur la scène-avant ou hors zone.
- Vitesse : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur la vitesse et les autres fixations sont sur la scène-avant ou hors zone.
- Rétro int et Vitesse : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur la vitesse et une autre sur le rétroviseur intérieur, les autres fixations sont sur la scène-avant ou hors zone.
- BVA : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur la BVA.
- Caméra : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur la Caméra.
- Compte-tours : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur le Compte-tours.
- Heure : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur l'Heure.
- Essence : le pattern oculomoteur comprend au moins une fixation sur l'Essence.

### **III.2.4 Synthèse**

Les résultats présentés ci-dessus sont issus de la toute première mise en oeuvre de l'oculomètre ETS sur route réelle. Tous les enregistrements ont fait l'objet d'un traitement informatisé avec le logiciel EYENAL. Seuls les enregistrements vidéo de quelques sujets ont été "dépouillés" en détail.

La durée des enregistrements n'est pas suffisante pour tester l'influence du temps sur les paramètres retenus (une telle étude ne faisait pas partie des objectifs initiaux du test). Par contre, les résultats montrent l'intérêt qu'il convient de porter à la "situation" de conduite : environnement routier mais également interactions avec les autres usagers. Un codage de la situation de conduite est proposé. Par ailleurs, le style de conduite a une influence, parfois faible mais significative, sur certains paramètres oculomoteurs. Ceci justifie la prise en compte du facteur "style de conduite" dans la composition de la population expérimentale.

### III.3 Expérimentations réalisées avec MAP

#### III.3.1 Premières expérimentations sur route réelle

Les premières expérimentations sur route réelle ont été menées en 1996 et 1997. Elles visaient à la fois à progresser dans la validation de la méthode et dans le développement de critères d'alerte au conducteur. Le premier critère évalué consistait à émettre une alerte sur deux niveaux (orange ou rouge) correspondant à deux niveaux de gravité de baisse d'attention. L'alerte, qui était seulement visuelle, était communiquée à un observateur assis à l'arrière du véhicule. Ce dernier était chargé, une fois l'alerte terminée, d'en demander au conducteur une interprétation. Ces expérimentations ont abouti aux résultats suivants :

- 93% des évolutions détectées trouvent une explication, soit dans un changement de l'environnement de conduite, soit dans une altération de l'attention du conducteur. La méthode est donc fiable pour détecter les évolutions du comportement du conducteur,
- les critères d'alerte à deux niveaux de gravité sont trop pessimistes. En effet, les 2/3 des alertes rouges auraient dû être oranges,
- la validation des alertes est délicate pour deux raisons. D'une part, l'alerte ne parvient pas directement au conducteur. Elle lui est signalée par l'observateur lorsqu'elle prend fin. Ce décalage temporel rend difficile son interprétation par le conducteur. D'autre part, le conducteur n'est généralement pas conscient de son état, ce qui complique d'autant la validation et nous a obligés, lors du dépouillement, à rechercher des indications pertinentes sur les images vidéo enregistrées pendant le trajet, en particulier celles du visage du conducteur. Un outil rigoureux et fiable est indispensable à une validation objective du système.

Par conséquent, les travaux de validation de la méthode MAP sur route réelle se sont poursuivis selon trois axes :

- la recherche de critères d'alerte mieux adaptés au niveau de dégradation de la vigilance, plus précis et plus fiables,
- la recherche d'une méthode objective de validation de ces critères,
- la mise au point d'un véhicule prototype autonome permettant des expérimentations en conditions de roulage non contrôlées (circulation en " libre service ").

#### III.3.2 Amélioration des critères d'alerte

Le dépouillement des expérimentations réalisées en 1997 a été effectué en tenant compte des commentaires des conducteurs pendant le trajet, des images vidéo du visage analysées grossièrement a posteriori, et des souhaits des conducteurs émis lors des deux réunions de debriefing. La première a été réalisée à la fin du trajet, la seconde avait lieu quelques jours plus tard après analyse des images vidéo. Ainsi, pour chaque alerte générée, nous avons émis des hypothèses quant à sa pertinence, et à la nature de la baisse d'attention qui lui avait donné naissance. Nous avons ensuite regroupé ces hypothèses en trois groupes, ou classes : distraction ou inattention légère, rêverie ou baisse de concentration moyenne, et enfin fatigue ou tendance à la somnolence. Ces hypothèses ont été superposées aux évolutions détectées par MAP, afin de voir si l'allure des évolutions était spécifique à chacun de ces groupes.

Des paramètres statistiques ont ensuite été recherchés pour caractériser les quatre classes

suivantes : l'absence d'évolution, et les baisses d'attention légères, moyennes et graves. Puis nous avons cherché à séparer linéairement, c'est-à-dire simplement, les classes, afin d'automatiser la décision à partir du calcul de ces paramètres statistiques.

Les résultats obtenus sont bons (table III.12). Cependant, ils sont à considérer avec prudence pour deux raisons :

- Ils sont obtenus avec les données ayant servi à établir les frontières entre les classes. Un jeu de test indépendant doit être utilisé pour pouvoir valider et généraliser ces résultats
- L'étiquetage des données, c'est-à-dire l'interprétation des évolutions de la conduite en quatre états du conducteur, a été réalisée à l'aide de données essentiellement subjectives, et sans recherche systématique des défaillances du conducteur dans les zones où aucune évolution de la conduite n'a été observée. Ainsi, aucune information sur les "manques", c'est-à-dire sur les défaillances non signalées par le système, n'est disponible.

Reconnaissance	Population des classes d'origine					Total
		1	2	3	4	
1		406	0	6	0	412
2		22	202	10	9	243
3		29	15	349	0	393
4		0	6	12	105	123
Tot		457	223	377	114	1171

Table III.12 : Résultats de classification : matrice de confusion.

Cette étude constitue une étape préliminaire vers la graduation des niveaux d'alerte. Cette graduation ne peut être fiable que si les points utilisés pour la définir, c'est-à-dire les hypothèses sur les baisses de vigilance observées, sont validées à l'aide de critères objectifs. Dans le cas de la somnolence, ces critères peuvent être donnés par des mesures physiologiques (électro-encéphalogramme ou électro-oculogramme par exemple), sachant que ces mesures sont intrusives et ne rentrent pas dans le cadre de la démarche que nous souhaitons mettre en oeuvre. Mais en ce qui concerne la distraction ou la rêverie, il n'existe aucune mesure de ce type. Nous nous sommes tournés vers une étude fine et systématique du comportement.

### II.3.3 Une méthode objective de validation : l'analyse du comportement

Une caméra supplémentaire a été installée dans le véhicule, afin de disposer d'une image rapprochée du visage des conducteurs, et d'une image "grand angle" du buste permettant d'observer sa posture, ses mouvements de tête ainsi que les mouvements de ses mains sur le volant et le combiné. Un répertoire comportemental a ensuite été élaboré. Il est composé de la liste des comportements à observer, jugés représentatifs d'une dégradation des capacités d'attention du conducteur. Cette dégradation peut être consécutive à la fatigue et au besoin de sommeil du sujet, mais aussi à un détournement de l'attention par un objet extérieur à la conduite. Les comportements relevés ont ensuite été analysés à l'aide des statistiques. Cette analyse doit aboutir à un repérage temporel des périodes pendant lesquelles les sujets ont été victimes de baisses d'attention et de baisses de vigilance.

Cette méthode est actuellement appliquée dans le cadre d'expérimentations avec un panel de 45 conducteurs. Les expérimentations proprement dites se sont déroulées de juin à septembre 99.

Chacun des sujets a conduit le véhicule expérimental sur un trajet autoroutier de 550 à 600 km, composé d'un aller-retour effectué entre 9h et 17h. Cinq parcours autoroutiers différents ont été proposés.

Le repérage temporel des périodes de baisse de vigilance et d'attention par analyse des comportements est actuellement en cours sur ces expérimentations. Il est utilisé pour améliorer les critères d'alerte et estimer les performances de MAP en détection de baisse de vigilance et d'attention. Les résultats complets de l'exploitation de ces expérimentations seront disponibles fin 99.

Ces mesures de performances ne peuvent se faire qu'en conditions de roulage contrôlées du fait de l'équipement important qu'elles nécessitent dans le véhicule (caméras, magnétoscopes) et des manipulations qui en découlent (réglages, changement des cassettes, ...). La présence d'un expérimentateur à bord, le respect d'un protocole rigoureux (choix du trajet, des horaires, ...) restreignent inévitablement le champ de validation du système. De plus, cette expérimentation n'apporte aucune information quant à l'acceptabilité du système par le conducteur, et sa performance perçue. Une évaluation complémentaire, en conditions de roulage non contrôlées, est indispensable à l'évaluation complète du système. Pour la mener à bien, le véhicule expérimental doit être rendu totalement autonome.

### ***II.3.4 Validation en conditions de roulage non contrôlées***

L'objectif de cette phase est d'effectuer une évaluation subjective du système MAP, c'est-à-dire d'en mesurer la performance perçue et d'en estimer l'acceptabilité par les conducteurs. En effet, il est possible qu'un système puisse être performant, voire prédictif, mais que les avertissements qu'il délivre ne soient pas perçus comme tels et qu'il soit donc mal accepté (et vice versa). L'acceptabilité du système dépend de la performance perçue (bonne adéquation entre l'alerte et la perception qu'a le conducteur de son état) mais aussi de la forme du retour d'information et de sa compréhension par le conducteur. C'est pourquoi les aspects objectifs et subjectifs de la détection sont complémentaires et doivent être étudiés parallèlement.

Cette phase consiste donc à laisser un certain nombre de véhicules prototypes entre les mains de conducteurs non avisés, afin d'évaluer le système dans des conditions non contraintes. Pour rendre le véhicule autonome, deux fonctionnalités ont du être ajoutées au système embarqué :

- Un déclenchement automatique
- Une interface d'alerte

#### **II.3.4.1 Déclenchement automatique**

L'algorithme met en évidence des évolutions par rapport à une conduite de référence mémorisée au début du trajet. Ce principe n'a pour l'instant été validé que sur autoroute et il faut donc que la conduite mémorisée soit représentative d'une conduite autoroutière. Jusqu'alors, le programme embarqué était déclenché à la main, autorisant la recherche de la conduite de référence seulement lorsque les conditions de conduite étaient jugées adéquates. Pour s'affranchir d'un déclenchement manuel, il faut que le système soit capable de reconnaître les conditions de roulage dans lesquelles il est autorisé à fonctionner.

Un module de détection de conduite autoroutière a donc été développé. Il tient compte de la

vitesse du véhicule mais aussi de la stabilité de la position de la pédale d'accélérateur, caractéristique d'une conduite autoroutière "de croisière". Une fois les conditions de conduite autoroutière détectées, le programme se déclenche automatiquement et la recherche de la conduite de référence est autorisée.

#### II.3.4.2 Interface d'alerte

Le dernier maillon de la chaîne composant le système embarqué est le retour d'information au conducteur, c'est-à-dire l'interface d'alerte. Il s'agit d'avertir le conducteur que son attention s'est dégradée, alors même que sa perception sensorielle est diminuée. Par ailleurs, si les critères d'alerte différenciée sont validés, une alerte différenciée sera probablement nécessaire afin d'adapter le retour d'information à la nature de la baisse d'attention ou de vigilance détectée. Une étude est actuellement en cours sur ce point, afin de trouver le meilleur compromis efficacité, acceptabilité et possibilité d'intégration sur véhicule. En attendant les conclusions de cette étude, une solution minimale est actuellement implantée sur véhicule. Elle consiste à émettre un signal sonore spécifique lorsqu'une baisse de vigilance est suspectée par le système.

#### II.3.4.3 Mise en place d'une mini-flotte

Un véhicule a été équipé d'un système embarqué autonome, qui se déclenche et s'éteint automatiquement et génère des alertes sonores spécifiques lorsqu'une baisse de vigilance est suspectée. Ce véhicule est également équipé d'un microphone et d'un système d'enregistrement de messages audio permettant au conducteur de valider ou d'infirmer chaque alerte générée. Des questionnaires post-trajets doivent également être remplis par les conducteurs. Toutes ces informations doivent nous permettre d'apprécier :

- La perception de l'alerte par le conducteur
- La perception qu'a le conducteur de son niveau de vigilance
- La performance du système perçue par le conducteur et le niveau de confiance qu'il lui accorde

Un premier véhicule est opérationnel depuis octobre 99. Il est utilisé par le personnel PSA pour effectuer de longs trajets professionnels sur autoroute. D'autres véhicules (10 maximum) seront également mis en service dans les mois à venir.



## IV EXPERIMENTATION FINALE AVEC SHERPA-VALENCIENNES

### IV.1 Synthèse des acquis suite aux expérimentations préliminaires

Les différentes expérimentations menées sur route réelle et en simulateur ont tout d'abord permis de faire le point sur le caractère opérationnel des différents dispositifs et outils utilisés. Un certain nombre de problèmes ont été mis en évidence, notamment :

- 1/ Le fonctionnement de l'oculomètre ETS présente encore quelques problèmes qui en limitent l'utilisation à des durées assez brèves, peu compatibles avec la réalisation d'expérimentations sur la vigilance.
- 2/ De nombreuses difficultés ont été rencontrées pour reproduire un trajet autoroutier réel sur simulateur, par exemple l'absence d'éditeur de panneaux.

En conséquence, les expérimentations finales de cette étude ont été restreintes au contexte de la conduite simulée.

L'expérience accumulée au cours des prétests a permis de définir un certain nombre de contraintes concernant leur déroulement, de façon à recueillir des données contenant un maximum d'informations exploitables. Parmi ces contraintes, on peut mentionner :

- La nécessité d'avoir recours à une durée d'expérimentation "utile" beaucoup plus longue que lors des prétests réalisés à Bièvres (160 km) : il a été décidé que lors des test finaux le parcours devait comprendre au moins 300 kilomètres "utiles", hors prise en main du simulateur par le sujet.
- Le souci d'avoir une population expérimentale la plus homogène possible. Dans ce sens, des contraintes ont été fixées sur les sujets (sexe, âge, expérience de la conduite, ...). De plus, un soin tout particulier a été apporté au déroulement des sessions d'apprentissage de la conduite en simulateur (prise en main systématique sur un circuit dédié et parcours autoroutier d'initiation dans des conditions très proches de celles de l'expérimentation).
- La nécessité d'un apprentissage de la procédure de calibration de l'oculomètre, afin d'éviter des calibrations répétitives lors de l'expérimentation proprement dite.
- Le besoin d'avoir un circuit autoroutier homogène dans ses tronçons et présentant une certaine périodicité dans sa géométrie, afin de pouvoir comparer les évolutions de la conduite au fur et à mesure des kilomètres parcourus ; avec de plus, sur ce même circuit, un début de parcours permettant le "lancer" du véhicule et la stabilisation de la conduite avant le roulage sur les tronçons analysés.

La prise en compte de ces principales contraintes et le respect d'un certain nombre de règles complémentaires ont permis d'aboutir au protocole expérimental présenté dans le paragraphe ci-après. L'expérimentation finale vise donc à mettre en oeuvre l'ensemble des "outils" mis au point lors des expérimentations préliminaires, l'objectif étant l'analyse "simultanée" des signaux véhicule, des mouvements des yeux et de la tête, des paramètres liés au comportement du conducteur et du résultat fourni par le système MAP au moyen de l'ACM.

## IV.2 Protocole expérimental

### IV.2.1 Population de conducteurs

Suite à l'envoi d'un communiqué sur la messagerie électronique de l'Université, un peu plus de 50 conducteurs se sont portés volontaires pour participer à l'expérimentation. Ce communiqué était relativement sélectif puisque les critères suivants étaient demandés :

- sexe masculin et pratique régulière de l'autoroute (le but était de conserver une certaine homogénéité avec la population de conducteurs effectuant les tests sur route réelle chez PSA) ;
- plus de 5 ans de permis (notamment afin d'éviter une forte participation d'étudiants) ;
- vue non corrigée et taille inférieure à 1 mètre 85 (afin de faciliter la mise en oeuvre de l'oculomètre).

Afin de vérifier la capacité des sujets à réaliser les tests, des séances individuelles de "prise de contact" d'environ une heure étaient organisées. Ces séances visaient à familiariser le conducteur avec SHERPA et également à détecter les sujets sensibles au "mal du simulateur". Pour cela, les conducteurs effectuaient un premier trajet d'environ 10 km sur une route départementale puis un trajet autoroutier de 24 km. Ce trajet autoroutier était parcouru une seconde fois avec l'oculomètre pour roder les sujets à la procédure de calibration et les habituer au port du casque.

A l'issue de ce roulage, les conducteurs étaient invités à remplir trois questionnaires :

- une fiche de renseignements orientée sur leur expérience de conduite et sur leurs antécédents en matière d'accidents de la route ;
- un questionnaire - élaboré par PSA lors de l'expérimentation avec l'oculomètre ETS - visant à identifier le caractère "économique" ou "sportif" de la conduite ;
- un questionnaire de matinalité / vespéralité.

Compte tenu de la durée de l'expérimentation finale (environ 3 heures de conduite), les sujets "peu à l'aise" dans le simulateur suite à ce premier roulage ont été écartés, de même que les conducteurs ayant une conduite très sportive ou/et une attitude ludique vis-à-vis du simulateur.

Finalement, 41 conducteurs ont pris part à l'expérimentation proprement dite (13 étudiants, 9 doctorants, 17 personnels UVHC et 2 extérieurs). L'âge moyen est de 28 ans (minimum : 21 ans ; maximum : 37 ans).

### IV.2.2 Déroulement d'un test

Pour le test proprement dit, les sujets devaient effectuer un trajet exclusivement autoroutier de 340 kilomètres au total. Compte tenu des contraintes liées à l'utilisation de l'oculomètre (port du système optique pendant 45 minutes maximum), le déroulement d'un test était le suivant :

- 1ère phase : 84 km avec l'oculomètre ;
- 2ème phase : 84 km sans l'oculomètre (le casque était néanmoins conservé pour la mesure des mouvements de tête) ;
- 3ème phase : 84 km avec l'oculomètre sur un trajet rigoureusement identique à la première phase ;
- 4ème phase : 84 km sans l'oculomètre (casque pour la mesure des mouvements de tête).

Avant de commencer et après chaque phase, le conducteur devait remplir un questionnaire portant principalement sur son état physique et sur la source de ses "maux" éventuels. A l'issue de l'expérimentation, un dernier questionnaire concernant le réalisme du simulateur était également remis aux conducteurs.

### **IV.2.3 Définition du parcours**

Les expérimentations précédentes ont montré qu'une analyse de données rigoureuse nécessite d'introduire un certain nombre de contraintes au niveau de l'élaboration de la base de données visuelles, notamment :

- L'analyse devant prendre en compte le type de "tronçon", il est intéressant d'avoir recours à un nombre assez limité de types (ligne droite et virages à droite et à gauche avec seulement deux rayons de courbure) de même qu'à des longueurs toutes égales.
- Il faut prévoir, en début de trajet, une période de "mise en jambes" pendant laquelle les données ne sont pas analysées. Par ailleurs, la méthode MAP nécessite une ligne droite d'environ 5 km afin de garantir un bon apprentissage initial.
- L'analyse de données ne doit pas prendre en compte la fin du parcours, pendant laquelle le conducteur se "relâche" et modifie totalement son comportement.

En conséquence, le trajet autoroutier spécialement créé pour l'expérimentation finale se décompose en une succession de 12 "modules standards" de 24 kilomètres, chaque module étant lui-même composé de 12 tronçons de 2000 mètres chacun.

Les différents types de tronçons retenus sont :

- LD : ligne droite ;
- VG5 : virage à gauche, rayon de courbure de 5000 mètres ;
- VD5 : virage à droite, rayon de courbure de 5000 mètres ;
- VG2 : virage à gauche, rayon de courbure de 2000 mètres ;
- VD2 : virage à droite, rayon de courbure de 2000 mètres.

Le "module standard" se compose donc de 12 tronçons de 2 km. Il comporte 6 tronçons droits, 4 virages "normaux" et 2 virages "serrés". Il est défini "arbitrairement" comme suit :

VD5, LD, VD2, VG5, LD, LD, VG5, LD, VD5, LD, VG2, LD.

Chacune des 4 phases du protocole comporte 3 modules auxquels sont ajoutés :

- en début de parcours une aire de service placée sur une ligne droite de 2 km ; elle permet un démarrage et une phase d'accélération jusqu'à la vitesse de croisière ; elle est suivie par la ligne droite de 5 km nécessaire pour la phase d'apprentissage de la conduite de référence dans la méthode MAP ;
- en fin de parcours une ligne droite de 3 km (i.e. supérieure à la distance de visibilité de 2 km) ; elle est suivie par une aire de service placée sur une ligne droite de 2 km.

Pour contribuer au réalisme, chaque phase débute et se termine sur une aire de repos. Le trajet total comporte donc 4 phases de 84 km, soit un total de 336 km.

Le mobilier (signalisation, maisons, végétation, échangeurs, aire de service, ...) est réparti de façon homogène sur les quatre phases. Cependant, afin de faciliter les comparaisons au niveau de l'activité oculaire, le premier et le troisième parcours sont rigoureusement identiques.

#### **IV.2.4 Données recueillies**

Les données recueillies sur les différents équipements sont :

- sur le calculateur Silicon Graphics de SHERPA, à 120 Hz (fréquence du modèle dynamique)
  - le temps en secondes
  - la position de la pédale d'accélérateur en %
  - la vitesse de la pédale d'accélérateur en %/s
  - l'angle au volant en radians
  - la vitesse angulaire du volant en radians/s
  - le couple volant en N.m
  - la vitesse du véhicule en m/s
- sur la Silicon à 30 Hz (fréquence image)
  - le temps en secondes
  - le numéro de l'image affichée
  - l'abscisse curviligne du véhicule en m
  - la position latérale du véhicule en m
  - le cap du véhicule en degrés
- sur l'ASL à 50 Hz (fréquence vidéo)
  - le numéro d'échantillon
  - les coordonnées x,y du regard dans le repère absolu en centimètres
  - les positions et orientations de la tête en centimètres et en degrés
- sur le PC MAP
  - la position de la pédale d'accélérateur en %
  - l'angle au volant en degrés
  - la vitesse du véhicule en m/s
- sur les bandes vidéo
  - le visage du conducteur
  - l'ensemble du buste du conducteur
  - l'image de la scène routière
  - le cas échéant, la vidéo ASL (incrustation de la direction du regard dans l'image scène et image de l'oeil en gros plan)
  - l'ambiance sonore de la cabine

L'archivage de ces données est synchronisé en temps réel par un calculateur dédié qui joue le rôle de "chef d'orchestre" (cf. second rapport intermédiaire).

### IV.3 Méthodologie d'analyse des données et premiers résultats

#### IV.3.1 Objectif de l'analyse statistique

On se fixe ici comme objectif l'analyse conjointe de deux ensembles de données :

- les données relatives à la cinématique du véhicule et aux mouvements de tête du conducteur ;
- les données relatives à l'activité oculaire du conducteur.

Le modèle d'échelle des variables relatives aux deux ensembles est de type *quantitatif* ; néanmoins, les signaux donnant les positions oculaires comportent une "sémantique" liée à l'image regardée qui les rend exploitables plutôt sous la forme d'une échelle qualitative. La combinaison des échelles horizontales et verticales de l'image est alors remplacée par une échelle qualitative dont les valeurs (ou modalités) sont liées à l'image. La présence de ces deux modèles d'échelles complique fortement l'analyse statistique. En conséquence, l'analyse statistique comportera trois parties :

- 1) l'analyse des données autres que les mouvements oculaires, en posant donc le problème de la caractérisation dans l'optique de les mettre en relation avec les données oculaires ;
- 2) l'analyse des données oculaires ;
- 3) la mise en relation de deux ensembles de données.

#### IV.3.2 Analyse des données relatives à la voiture et à la tête

Les deux rapports précédents ont longuement insisté sur les aspects méthodologiques de l'analyse statistique en présence de variables quantitatives uniquement. Notamment, l'approche retenue était essentiellement exploratoire et multivariable, basée sur les méthodes factorielles ; une approche confirmatoire basée sur des tests non paramétriques venant ensuite pour étudier plus localement certains phénomènes mis en évidence par les analyses. En amont de ces analyses, une phase essentielle a été mise en exergue : la caractérisation des données. Celle-ci consiste en la construction d'indices statistiques résumant les signaux à l'intérieur d'une fenêtre temporelle. Les indices retenus étaient alors la moyenne et l'écart-type. En présence de données qualitatives, retenir de tels indices conduit à considérer, dans le cas d'une analyse globale, des données hétérogènes dont la mise en relation s'avère complexe. Restant, dans un premier temps tout au moins, dans un contexte exploratoire et multivariable, on se propose donc ici de reconsidérer le problème de la caractérisation de données et de l'analyse des données ainsi produites.

Préalablement à une analyse sur la vigilance proprement-dite, on se fixe ici un objectif sur un plan "plutôt statistique" : l'étude comparative de diverses méthodes de caractérisation. Notons qu'une telle étude comparative est quasi-absente dans la littérature. Cette étude s'avérant longue a priori, on considère les données d'un seul conducteur pour une période de conduite où les données oculaires sont présentes. La période 3 est retenue dans la mesure où les données devraient être plus "riches" que celles de la période 1 (le conducteur ayant déjà parcouru plus de 170 kilomètres).

##### IV.3.2.1 Caractérisation

Les signaux fournis par les capteurs et le simulateur sont nombreux et divers. La caractérisation

a pour objet la définition :

- 1) des signaux à retenir ;
- 2) des indicateurs à considérer pour ces signaux, ces indicateurs étant calculés pour des fenêtres temporelles particulières.

Il est évident que les deux ensembles de choix ne sont pas indépendants. A titre d'exemple, considérons le problème de la caractérisation des mouvements de la tête de façon à pouvoir répondre aux deux questions suivantes :

- Q1 : Comment évolue la position de la tête - au sens des trois coordonnées et trois angles - en fonction du temps ?
- Q2 : Comment évolue l'activité gestuelle en fonction du temps ?

La caractérisation peut alors s'envisager plutôt sous *l'angle de l'automaticien* ou d'avantage sous *l'angle du statisticien*.

*Angle de l'automaticien :*

- 1) S'appuyant sur la notion de variable d'état, les signaux de position et de vitesse peuvent être considérés.
- 2) Ces signaux peuvent alors être résumés dans chaque fenêtre temporelle par la moyenne temporelle par exemple ; néanmoins, le signal vitesse évoluant de part et d'autre de zéro, il serait plus judicieux de considérer la valeur efficace. Bien entendu, on peut également chercher à caractériser les spectres d'amplitude ou d'énergie.

*Angle du statisticien :*

- 1) Considérer le signal de position.
- 2) Utiliser la moyenne arithmétique et l'écart-type, par exemple, sachant que ce second indice ne peut être considéré comme indicateur de l'activité gestuelle que si le signal est relativement stationnaire dans la fenêtre temporelle.

Pour tenter de répondre aux deux questions Q1 et Q2, un compromis entre ces deux points de vue consiste à :

- 1) Considérer les signaux correspondant à la position et à la valeur absolue de la vitesse.
- 2) Résumer chaque signal par la moyenne arithmétique.

On donne alors ci-dessous la façon dont les signaux sont repérés. On utilise les lettres :

- **V**, **T**, **P** et **O** pour désigner le **V**éhicule, la **T**ête du conducteur, la **P**édale d'accélérateur et le **vO**lant ;
- **X**, **Y** et **Z** pour désigner les directions ;
- **L**, **T** et **R** pour désigner le **L**acet, le **T**angage et le **R**oulis ;
- **d** pour désigner la **d**érivée.

Les signaux de base sont décrits dans le tableaux IV.1 ci-après.

Signification	Sigle de la variable	Unité (incertitude)
vitesse (approximativement dérivée selon X) du Véhicule	<b>dXV*</b>	m/s ()
position selon Y (latérale) du Véhicule	<b>YV</b>	m ()
position linéaire selon X de la Tête	<b>XT</b>	cm ()
position linéaire selon Y de la Tête	<b>YT</b>	cm ()
position linéaire selon Z de la Tête	<b>ZT</b>	cm ()
position angulaire autour de X — Roulis — de la Tête	<b>RT</b>	degré ()
position angulaire autour de Y — Tangage — de la Tête	<b>TT</b>	degré ()
position angulaire autour de Z — Lacet — de la Tête	<b>LT</b>	degré ()
Position relative de la pédale d'Accélérateur	<b>PA</b>	% ()
Angle au vOlant	<b>AO</b>	degré ()
Couple vOlant	<b>CO</b>	m.N ()

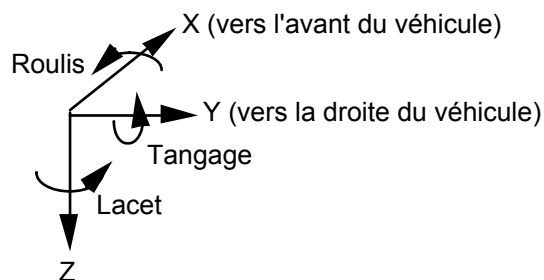


Tableau IV.1 : Variables de base et conventions de signe.

(\*) On utilise la lettre **d** pour tenter d'harmoniser les notations. Notons que le signal désigné par le sigle **dXV** ne correspond pas à la vitesse tangentielle (dérivé de la position X) mais à la vitesse effective de déplacement du véhicule sur la voie. Ces deux vitesses étant pratiquement identiques, on utilisera le sigle **dXV**.

Dans l'optique de répondre à la question Q2, les variables temporelles correspondant à la dérivée de la valeur absolue des signaux ci-dessus sont considérées. La lettre **d** précède alors les sigles indiqués dans le tableau IV.1

Précisons que du fait de l'intervention de l'expérimentateur sur le casque de l'oculomètre après la période 1 et avant la période 3 (afin d'enlever puis de remettre le bloc optique "oeil"), les 6 variables relatives à la position de la tête sont centrées par rapport aux moyennes calculées pour chaque période.

Les signaux retenus étant précisés, il importe maintenant d'indiquer la façon dont ils seront résumés dans chaque fenêtre temporelle. Deux approches peuvent être retenues :

- Construction d'indices statistiques *classiques*, comme la moyenne ou l'écart-type. Ces derniers sont faciles à calculer mais ne sont pas directement compatibles avec les données qualitatives oculaires ;

- Construction d'indices directement compatibles avec les données oculaires, en découpant les étendues des variables quantitatives en modalités ou fenêtres. Ces fenêtres seront dites "spatiales", par rapport aux fenêtres "temporelles" nécessaires à l'analyse de données évolutives.

On propose d'effectuer une analyse comparative de ces deux familles de méthodes.

#### IV.3.2.1.1 Analyse comparative des méthodes de caractérisation

Le but essentiel est ici de comparer C méthodes de caractérisation. La démarche est la suivante /Loslever et al., 97/ :

- Etape 1 : construction d'un ensemble  $\mathbb{D}0$  de distances sur les données initiales ;
- Etape 2 : pour chaque méthode de caractérisation c (c=1, ..., C), construction d'un ensemble  $\mathbb{D}1_c$  de distances ;
- Etape 3 : pour chaque méthode de caractérisation c (c=1, ..., C), mise en relation des deux ensembles ( $\mathbb{D}0$ ,  $\mathbb{D}1_c$ ), puis pour les C méthodes, recherche de celle donnant la meilleure relation.

La construction de l'ensemble de référence  $\mathbb{D}0$  est effectuée en considérant des fenêtres temporelles puis en comparant le signal (multidimensionnel) sur ces différentes fenêtres. Par exemple, considérons 10 fenêtres générant 10 ensembles  $\mathbb{E}0_i$  (i=1, ..., 10) contenant chacun le même nombre d'échantillons J.  $\mathbb{D}0$  est alors construit en comparant ces ensembles 2 à 2 ;  $\mathbb{D}0$  contient donc 45 distances  $d0(\mathbb{E}0_i, \mathbb{E}0_{i'})$  avec  $i \neq i'$ . Etant en présence de signaux multidimensionnels, la comparaison peut se faire en tenant compte de toutes les composantes à la fois ou en prenant les composantes une à une. La première approche induit une distance  $d0(\mathbb{E}0_i, \mathbb{E}0_{i'})$  globale mais nécessite de se donner une méthode de pondération des composantes ; la seconde approche ne nécessite pas l'introduction d'une telle méthode mais requiert autant d'analyses comparatives qu'il y a de composantes. Etant plus longue mais permettant de mieux comprendre les mécanismes de la caractérisation statistique, cette seconde approche est retenue.

Pour la composante x du signal multidimensionnel, la distance  $d0$  est la moyenne des valeurs absolues des différences :

$$d0(\mathbb{E}0_i, \mathbb{E}0_{i'}) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |x_{ij} - x_{i'j}|$$

où  $x_{ij}$  désigne la valeur de la composante pour l'ensemble de données i et pour l'échantillon temporel j.

Le même principe peut être retenu pour la construction de l'ensemble  $\mathbb{D}1_c$  en adaptant la distance au type de valeurs générées /Loslever et al. 1997/. Considérons quelques exemples :

- 1) moyenne arithmétique (c=1), la distance  $d1$  entre deux ensemble i et i' est alors simplement la différence absolue des 2 moyennes  $m_i$  et  $m_{i'}$  ;
- 2) écart-type (c=2), avec le même principe pour le calcul de  $d1$  ;



- 3) rapport écart-type/moyenne (i.e. indice de variation,  $c=3$ ), avec le même principe pour le calcul de  $d1$  ;
- 4) moyenne arithmétique et écart-type ( $c=4$ ),  $d1$  étant calculée en donnant le même poids à ces deux indicateurs (réduction de la variable distance par l'écart-type) ;
- 5) trois fenêtres spatiales de largeur identique (histogramme à 3 classes,  $c=5$ ),  $d1$  étant ici une moyenne sur trois différences.

Appliquons, à titre illustratif, la procédure en trois points pour deux composantes.

#### Exemple 1 : signal vitesse

Le signal vitesse ne fait pas apparaître de prime abord d'évolution monotone ou la présence de plusieurs classes, figure IV.2. La figure IV.4 montre la relation entre les ensembles  $\mathbb{D}0$  et  $\mathbb{D}1_c$  pour les 5 méthodes de caractérisation énoncées ci-dessus. A titre indicatif, la figure IV.3 montre les 4 fenêtres temporelles du signal vitesse donnant les deux distances minimale et maximale de  $\mathbb{D}0$ , pour les paires (5,6) et (1,7) respectivement. Une méthode de caractérisation  $c$  étant jugée d'autant meilleure qu'elle respecte l'ordre sur les distances initiales, ceci signifie que les 45 points doivent alors être le long d'une droite et le coefficient de corrélation doit être le plus élevé possible. Les 4 graphiques du haut, figure IV.4, montrent qu'une caractérisation utilisant la moyenne et l'écart-type est meilleure que celle considérant l'un ou l'autre de ces 2 indicateurs, ou une fonction de ceux-ci. En outre, la figure IV.3 met en évidence que la construction d'un histogramme à trois classes respecte mieux les distances entre les données initiales.

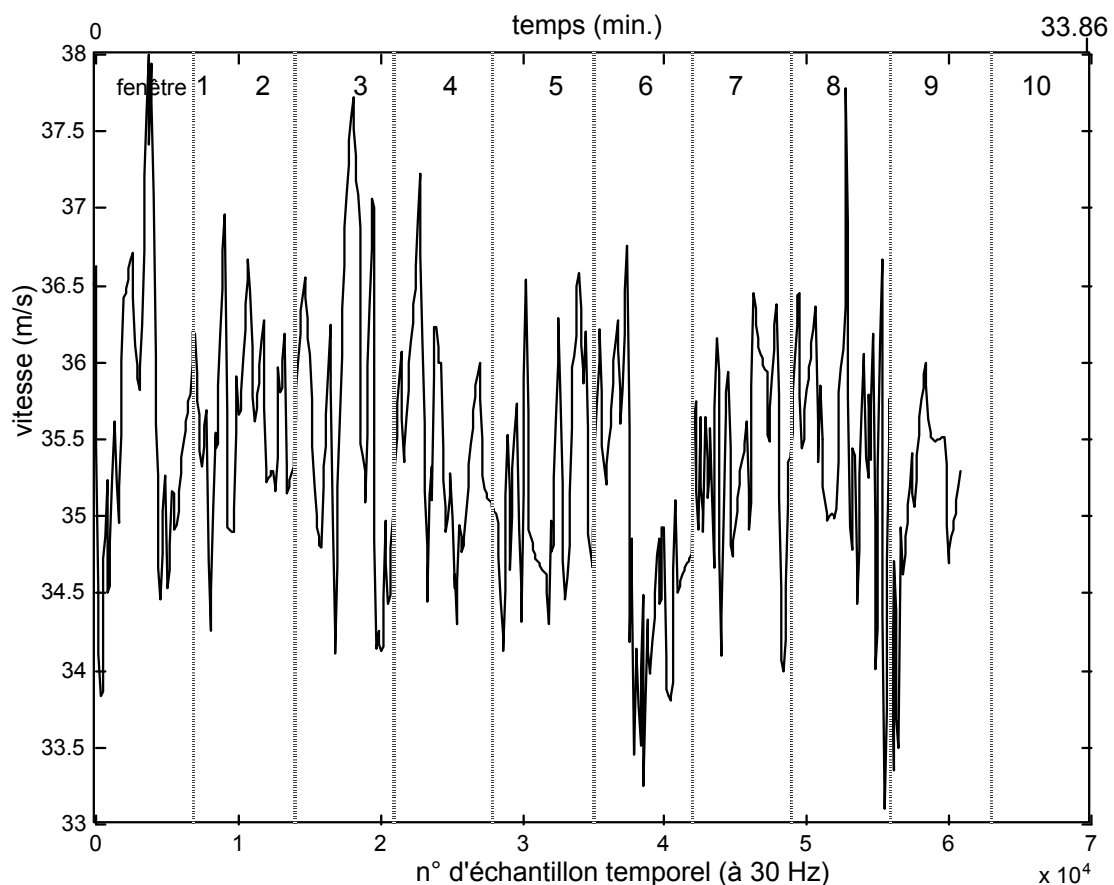


Figure IV.2 : Signal vitesse (3ème phase du protocole).

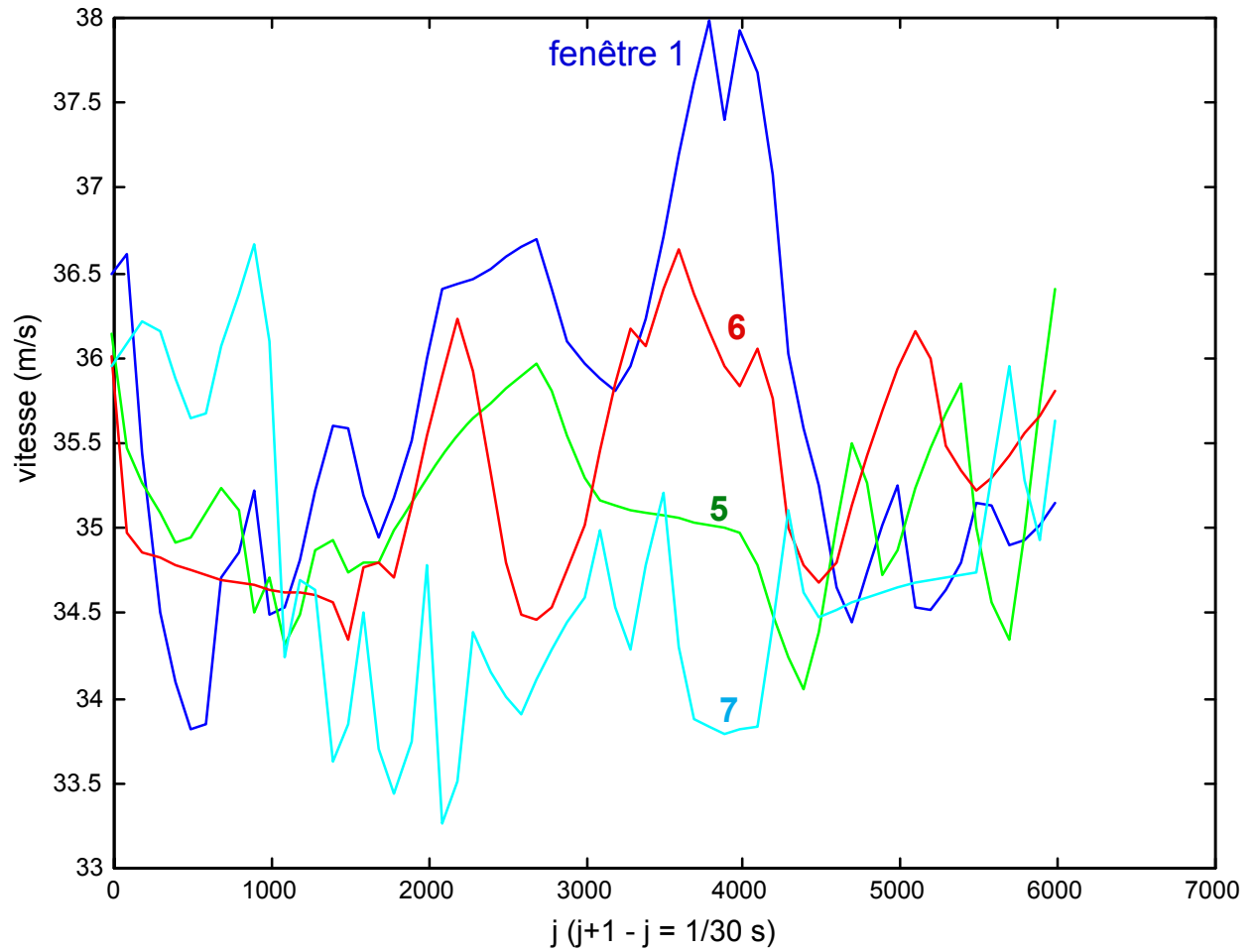


Figure IV.3 : Evolutions du signal vitesse pour 2 fenêtres temporelles jugées “ proches ” (5,6) et 2 fenêtres temporelles jugées “ éloignées ” (1,7), cf. figure IV.4.

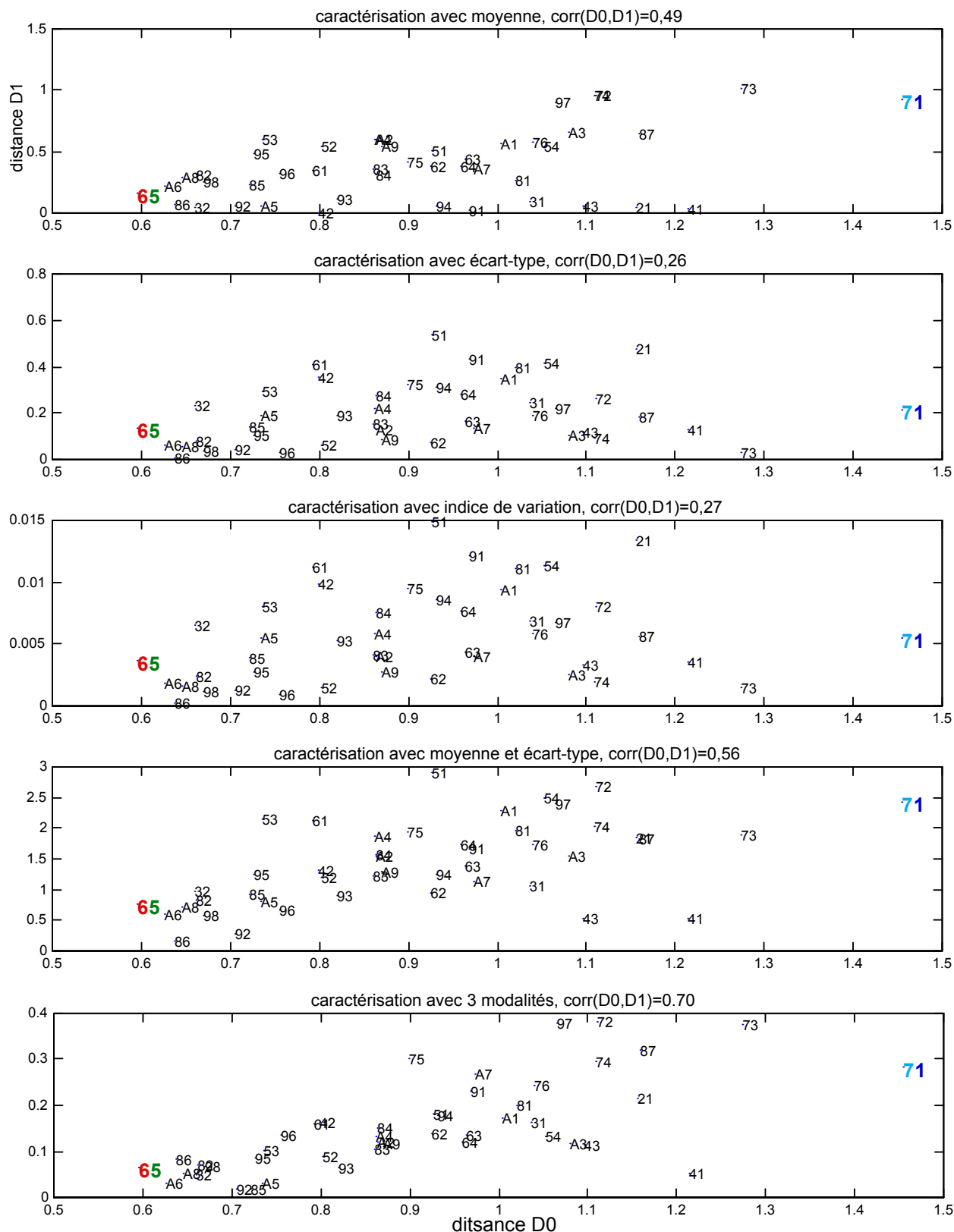


Figure IV.4 : Relation entre ensembles de distance  $D_0$  et  $D_{1c}$  pour 5 méthodes de caractérisation du signal de vitesse. L'étiquette de chacun des 45 points indique la paire d'ensembles  $(i, i')$  considérée ; elle est notée sur deux caractères  $ii'$  où  $i = 2, 3, \dots, 9, A$  et  $i' = 1, 3, \dots, 9$ .

Exemple 2 : signal de position angulaire de la tête / Z (lacet)

Le signal ne présente pas, de manière évidente, d'évolution monotone (cf. figure IV.5) ; en revanche il fait apparaître deux pics de grandes amplitudes à l'intérieur de la fenêtre temporelle 5. La figure IV.7 montre que les distances entre les moyennes vont de paire avec les distances entre les signaux (le coefficient de corrélation vaut 0,76) ; ceci n'est pas le cas pour les écarts-types (le coefficient est pratiquement nul). Ce dernier point explique probablement le fait que la relation est moins bien respectée quand on prend la moyenne **et** l'écart-type par rapport à la moyenne seule. Notons que cette dernière donne un coefficient de corrélation sensiblement plus grand qu'avec les trois effectifs.

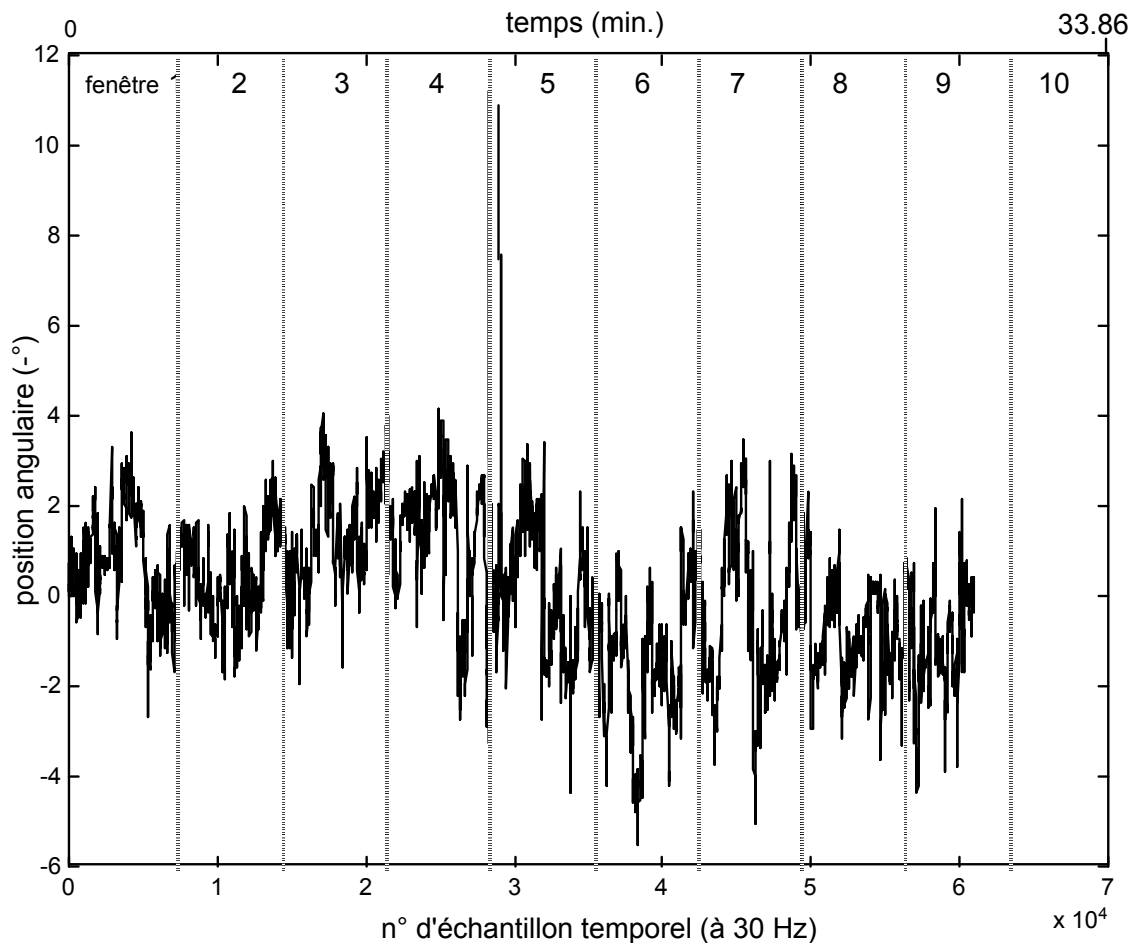


Figure IV.5 : Signal de position angulaire.

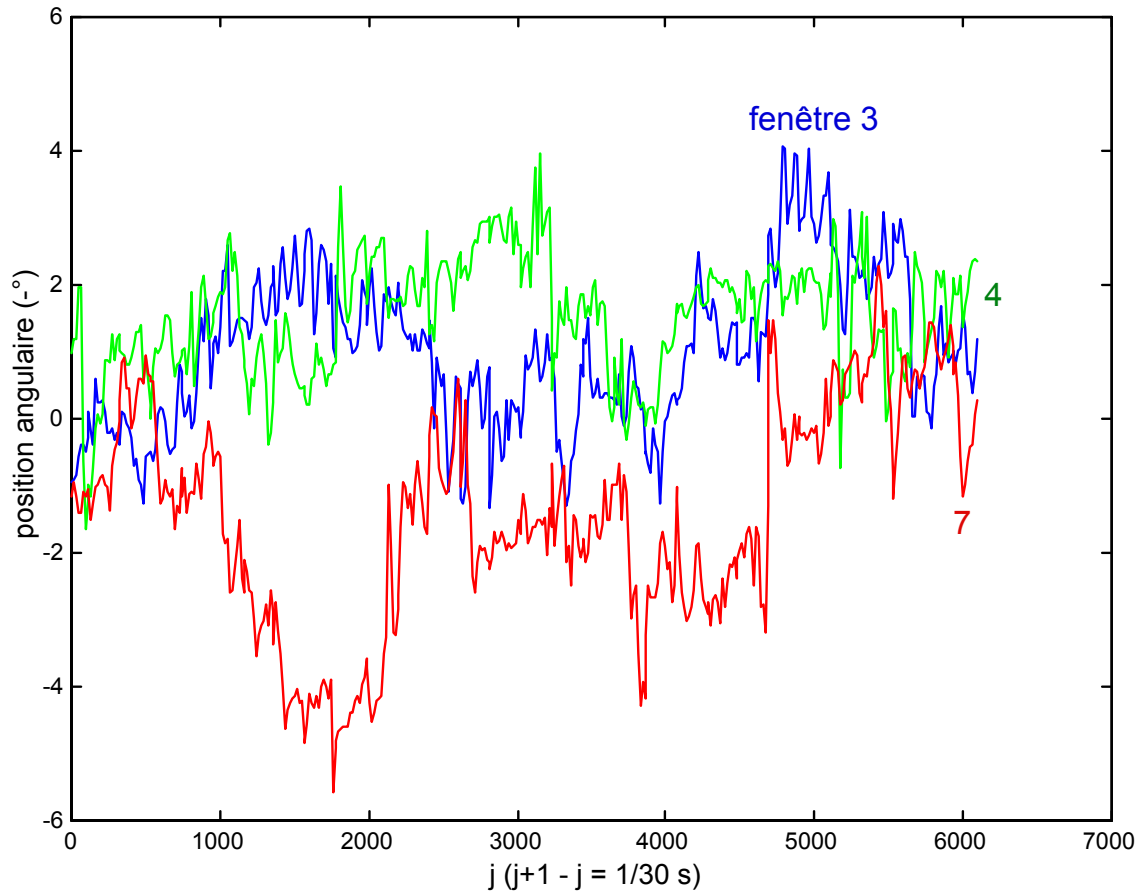


Figure IV.6 : Evolutions du signal de position angulaire pour 2 fenêtres temporelles jugées “ proches ” (3,4) et 2 fenêtres temporelles jugées “ éloignées ” (4,7), cf. figure IV.7.

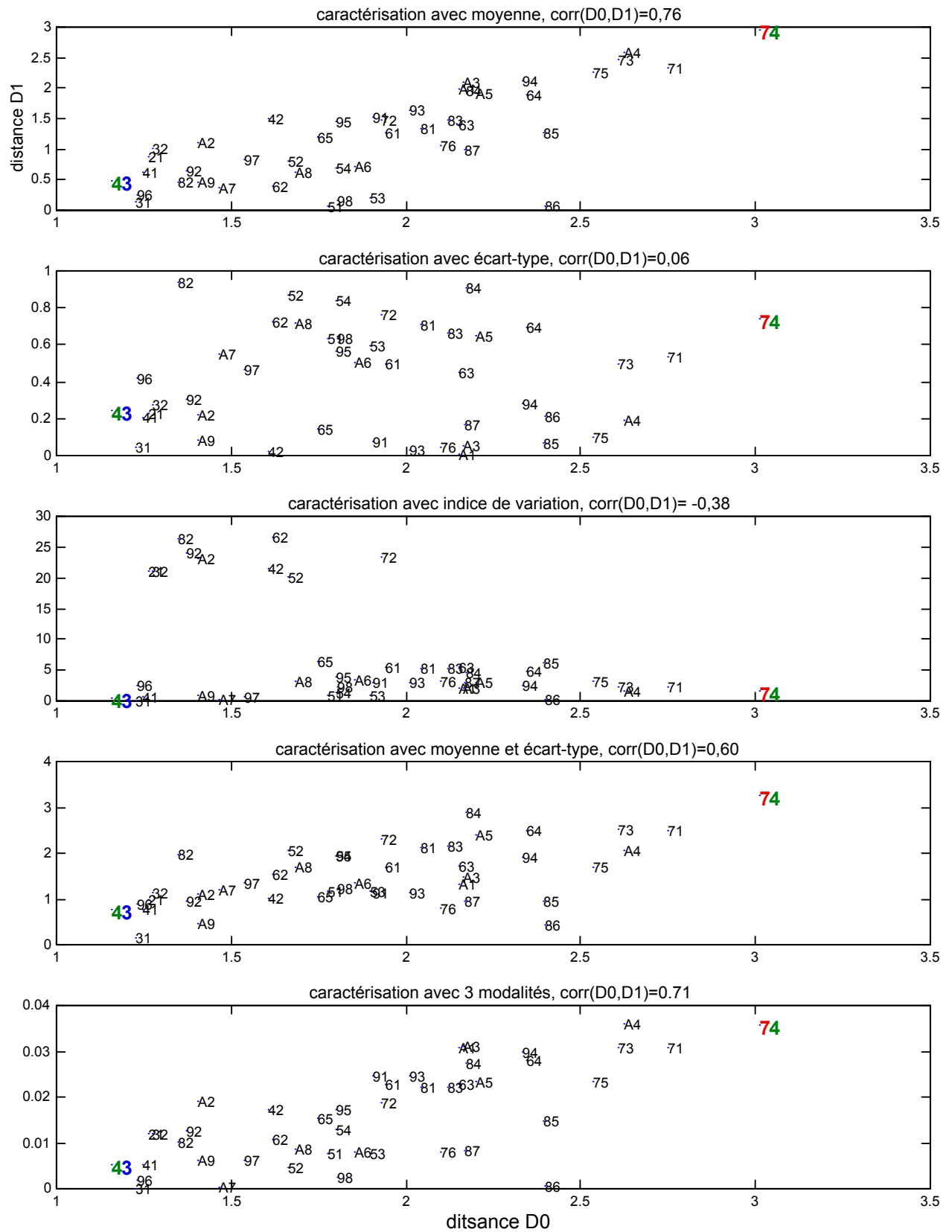


Figure IV.7 : Relation entre ensembles de distance  $D_0$  et  $D1_c$  pour 5 méthodes de caractérisation du signal de vitesse. L'étiquette de chacun des 45 points indique la paire d'ensembles  $(i, i')$  considérée ; elle est notée sur deux caractères  $ii'$  où  $i = 2, 3, \dots, 9, A$  et  $i' = 1, 2, \dots, 9$ .

### Commentaires :

Concernant la méthode d'évaluation, il est indéniable que, même quantitative, sa démarche se fonde sur de nombreux choix discutables (cf. /Loslever et al., 97/ pour un panorama de quelques autres éventualités possibles). Néanmoins, elle est à opposer à une approche totalement subjective, consistant à dire “ les données sont caractérisées par la méthode c. ”. En outre, la démarche d'évaluation proposée permet déjà une analyse approfondie des données.

Concernant les résultats trouvés sur les deux exemples proposés, constatons que les conclusions sont différentes. Considérons les deux propositions suivantes :

P1 : “ Utiliser la moyenne **et** l'écart-type donne un meilleur résultat qu'utiliser la moyenne ou l'écart-type, ou une fonction des deux ” ;

P2 : “ Utiliser trois effectifs donne un meilleur résultat qu'utiliser la moyenne **et** l'écart-type ”.

Les propositions P1 et P2 sont vraies pour la vitesse du véhicule et fausses pour la position angulaire de la tête autour de l'axe Z. Quelques explications peuvent alors être avancées. Tout d'abord, l'approche d'évaluation basée sur les distances  $d_0$  et  $d_1$  privilégie la moyenne arithmétique ( $d_0$  fait intervenir des écarts entre valeurs initiales et  $d_0$  est un écart entre valeurs moyennes). Ceci entraîne que si le signal est relativement stationnaire, avec une dispersion plus ou moins constante autour de la moyenne, les valeurs de  $d_0$  et  $d_1$  sont pratiquement identiques, donc le coefficient de corrélation  $c(D_0, D_1)$  est élevé ; la moyenne suffit alors à elle seule pour caractériser le signal. En dehors de ce cas d'école, de nombreuses autres situations peuvent se rencontrer.

Une première situation est celle où les évolutions de la moyenne et de l'écart-type intra-fenêtre évoluent de manière aléatoire. C'est le cas de la vitesse du véhicule, figures IV.7.a et b. La moyenne arithmétique n'est alors pas suffisante pour caractériser le signal dans chaque fenêtre temporelle ( $c(D_0, D_1)=0,49$ , cf. figure IV.4). Même si le coefficient de corrélation obtenu avec l'écart-type est faible ( $c(D_0, D_2)=0,26$ ), l'écart-type constitue un complément d'information quant à la description du comportement du signal dans la fenêtre temporelle et donc permet d'augmenter le coefficient de corrélation global ( $c(D_0, D_4)=0,56$ ).

Une autre situation est celle où l'évolution de la moyenne est plus ou moins monotone et l'évolution de l'écart-type aléatoire. Ceci est illustré par la position angulaire de la tête, figure IV.8c et d (la corrélation avec le temps de la valeur moyenne calculée fenêtre par fenêtre vaut  $-0,74$ ). La tendance décroissante de la moyenne arithmétique se retrouve bien au niveau d'un coefficient de corrélation élevé ( $c(D_0, D_1)=0,76$ , cf. figure IV.7). Les différences entre écarts-types ne vont pas de paire avec les distances entre les données initiales ( $c(D_0, D_2)$  est quasi-nul), ceci pénalise le coefficient relatif à la caractérisation fondée sur la moyenne et l'écart-type (le coefficient de corrélation passe de  $0,76$  à  $0,60$ ). La caractérisation utilisant les 3 fréquences est sensiblement moins bonne que celle utilisant la moyenne ( $c=0,71$  vs.  $0,76$ ).

Une étude sur d'autres composantes du signal montre que l'on retrouve plus ou moins l'une ou l'autre des deux situations ci-dessus. D'une manière sommaire, on peut donc dire que les propositions P1 et P2 sont vraies si la moyenne arithmétique donne un  $c(D_0, D_1)$  faible (entre  $0,3$  et  $0,6$ ) i.e. elle caractérise peu les données, et si l'écart-type donne un coefficient de corrélation du même ordre de grandeur ou plus petit que celui de la moyenne.

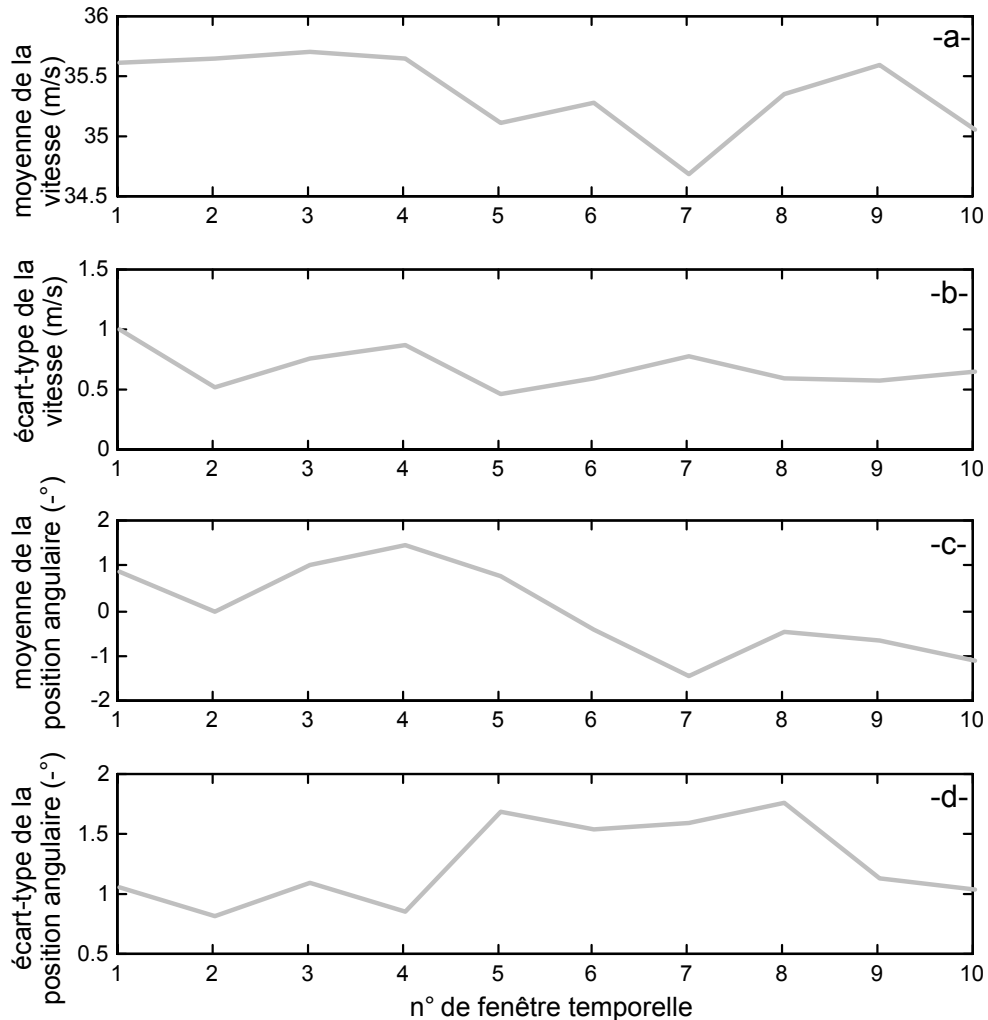


Figure IV.8 : Evolution au cours des 10 fenêtre temporelles de la moyenne et de l'écart-type (chaque fenêtre temporelle comporte 6095 valeurs).

Il importe alors d'ajouter quelques commentaires concernant ces deux résultats. Le premier est que si la démarche d'évaluation proposée permet de comparer de manière quantitative les méthodes de caractérisation, elle ne rend pas compte d'un autre aspect important, celui du nombre d'indicateurs utilisés pour caractériser de manière satisfaisante les données, par exemple avec  $c(D0,D1) > 0,7$ . Cet aspect, que l'on pourrait nommer "niveau de réduction des données", peut être traduit de manière quantitative par le rapport

$$r = \frac{\text{nombre de données en sortie de la caractérisation}}{\text{nombre de données en entrée de la caractérisation}}$$

Cet indicateur ne traduit aucunement la sémantique contenue dans les données mais sa minimisation semble être souvent utilisée dans la pratique. Cet indicateur est alors utilisé au détriment de la caractérisation par l'histogramme, d'autant plus que ce dernier requiert un temps de calcul nettement plus long ; par exemple, pour trois classes, un calcul effectué à l'aide du logiciel MATLAB donne un facteur 40 par rapport au temps de calcul de la moyenne et un facteur 2 par rapport au temps de calcul de la moyenne et l'écart-type. Néanmoins, il importe de rappeler que l'histogramme contient des notions de tendance centrale et de dispersion, la première notion n'étant pas traduite par la moyenne (par exemple, l'histogramme peut faire apparaître plusieurs modes ou



une forte dissymétrie), et la seconde n'étant pas considérée par rapport à la moyenne (comme l'est l'écart-type). S'il est indéniable que le découpage en intervalles constitue une perte d'information, il est possible de diminuer cette perte en utilisant des fenêtres spatiales comme celles de la figure IV.9, par exemple. La méthode d'évaluation de la caractérisation proposée ci-dessus donne un  $c(D0,D1)$  moyen qui croît de 0.55 à 0.65 quand on passe de trois fenêtres rectangulaires à trois fenêtres floues. Quant à la caractérisation à partir de la moyenne et de l'écart-type, la méthode d'évaluation donne un  $c(D0,D1)$  moyen de 0,58.

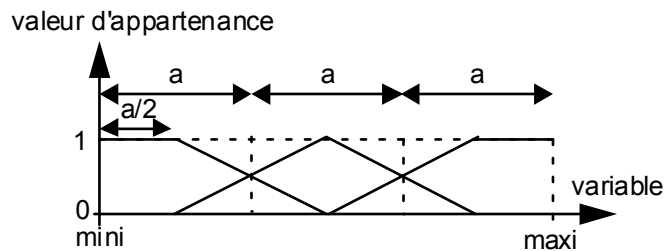


Figure IV.9 : Exemple de codage flou.

En conclusion, de par ses performances - au sens de la méthode d'évaluation donnée ci-dessus - et de la possibilité d'adaptation aux données, la caractérisation basée sur le découpage en fenêtres floues est retenue.

#### IV.3.2.1.2 Méthode de caractérisation retenue

Les différentes étapes sont les suivantes :

##### 1) Synchronisation et filtrage des signaux :

Les signaux étant échantillonnés à des fréquences différentes, ils doivent être préalablement synchronisés. L'analyse spectrale montre que l'énergie des signaux se trouve en deçà de 2 Hz. Les signaux sont donc synchronisés et filtrés à 6 Hz /Todoskoff, 99a/.

##### 2) Fenêtrage spatial :

Le nombre total de variables analysées étant relativement élevé (une quarantaine), uniquement trois fenêtres spatiales sont retenues ; elles correspondent aux *petites*, *moyennes* et *grandes* valeurs. Précisons qu'avec un découpage classique, c'est-à-dire avec des fonctions d'appartenance prenant la valeur 0 ou 1, chaque fenêtre est caractérisée par l'effectif des unités statistiques qu'elle contient ; dans le cas du découpage flou, la notion d'effectif est remplacée par celle de valeur d'appartenance moyenne (VAM).

Le principe du découpage spatial s'appuie sur les formes des distributions des signaux filtrés et sur la méthode d'analyse statistique. Les formes sont essentiellement de deux types : dissymétrique décroissante pour les signaux correspondant aux valeurs absolues des dérivées et (quasi-)symétrique de type Laplace-Gauss pour les autres. Notons la présence éventuelle de valeurs d'amplitudes relativement élevées mais extrêmement rares. Un découpage faisant intervenir uniquement un critère spatial est totalement tributaire de ces extréma, ce qui est préjudiciable dans la mesure où ces derniers peuvent être anormalement bas ou élevés. En outre, avec un tel critère, les modalités spatiales ont des poids différents dans l'analyse statistique, le poids de la fenêtre spatiale  $f_s$  étant la moyenne des valeurs d'appartenance à cette fenêtre. Pour ces deux raisons, un découpage donnant des poids quasi-identiques est préféré.

Ce choix étant fait, il importe également de tenir compte de la symétrie éventuelle de la distribution. Par exemple, si par construction la valeur zéro correspond à l'absence de phénomène (comme un angle nul qui signifie qu'il n'y a pas de rotation), il importe de centrer la modalité intermédiaire autour de cette valeur pivot. Dans les autres cas où une distribution symétrique est présente, la modalité intermédiaire est centrée autour de la médiane.

La figure IV.10 donne les histogrammes d'amplitude et les découpages respectifs pour quelques variables, ces derniers étant construits à partir de toutes les valeurs considérées dans l'analyse, à savoir celles relatives aux périodes 1 et 3 (24564 valeurs à 6 Hz). Il importe de souligner la cohérence entre l'histogramme et les données initiales. Notamment, l'histogramme de la position latérale sur la chaussée présente une allure gaussienne signifiant que le conducteur roule avec une tendance centrale quasi-stationnaire et des fluctuations symétriques par rapport à celle-ci. La position nominale peut alors être caractérisée par la médiane dont la valeur est celle correspondant au maximum de la fonction d'appartenance intermédiaire (environ 7,4 m, cette position étant donnée par rapport à la référence choisie pour la route). L'aspect symétrique de la distribution peut alors s'expliquer, entre autres, par le fait qu'il y a autant de virages à droite qu'à gauche et ce avec une distribution symétrique au niveau des rayons de courbure. Notons alors que, par rapport à la médiane, l'amplitude du mouvement latéral peut dépasser un mètre.

La présence d'une gaussienne est moins marquée pour la vitesse dans la mesure où le conducteur peut spontanément rouler plus ou moins vite pour certaines plages du trajet, sans que cette raison ne soit directement imputable au fait d'être en virage (les rayons de courbures sont suffisamment grands pour que le conducteur n'ait pas à ralentir). Le dessin des fonctions d'appartenance montre que la médiane est de l'ordre de 35 m/s, c'est-à-dire de l'ordre de 126 km/h. Un point intéressant à noter dans l'ensemble des dessins de la figure IV.10 est que la distribution de la position angulaire de la tête autour de l'axe Y n'est pas tout à fait symétrique. En effet, ce signal présente une tendance évolutive monotone. Ce dernier point confirme qu'une caractérisation à partir de la moyenne arithmétique et l'écart-type peut être moins pertinente qu'une caractérisation issue d'un découpage en fenêtres spatiales.

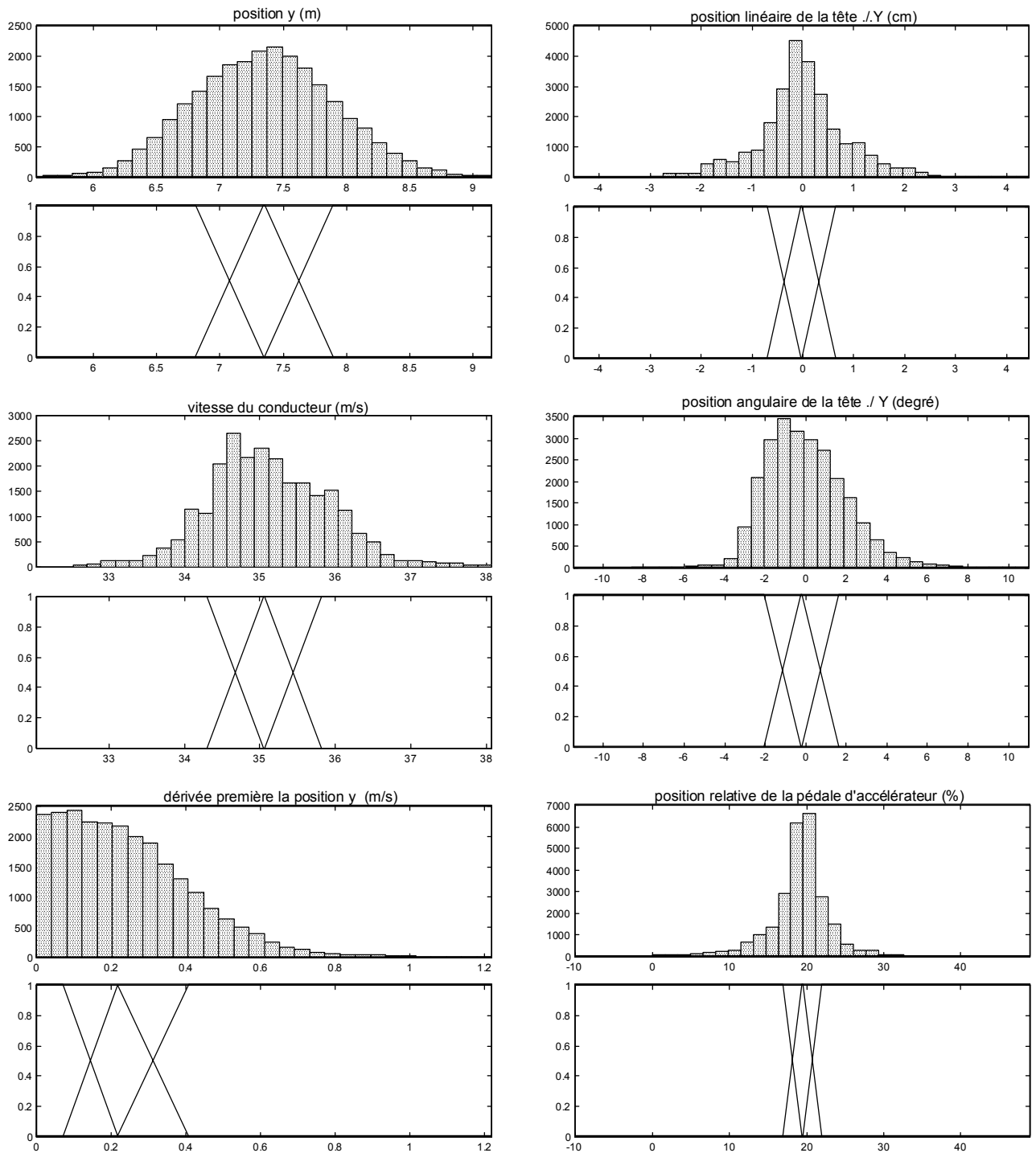


Figure IV.10 : Quelques exemples d'histogrammes d'amplitude et de découpages correspondants (l'histogramme est construit à partir des valeurs relatives aux périodes 1 et 3, soit 24564 valeurs à 6 Hz).

En présence de  $V=22$  variables et de  $E=24564$  échantillons temporels, les données issues du découpage spatial sont donc placées dans un tableau à  $E$  lignes et  $3 \cdot V$  colonnes contenant des valeurs d'appartenance entre 0 et 1.

### 3) Fenêtrage temporel :

Le découpage peut être uniquement basé sur un critère temporel (par exemple prendre des fenêtres de durée 10 mn) ou faire appel à un aspect spatial (par exemple, considérer des fenêtres temporelles dont les frontières sont les changements de "tronçon", ou de "tour"). Dans la perspective d'une analyse comparative des différents conducteurs mais aussi de la mise en relation de toutes les variables - et donc des mouvements oculaires - la présence d'un aspect spatial est indispensable. Afin de mettre en évidence d'éventuelles ressemblances pour des portions de circuit présentant des caractéristiques géométriques identiques, les fenêtres temporelles correspondent aux tronçons plutôt qu'aux tours. En conséquence, les valeurs d'appartenance trouvées ci-dessus sont moyennées à l'intérieur d'un même tronçon, ce qui revient à caractériser chaque tronçon par un histogramme à 3 classes. En présence de  $V$  variables temporelles et de  $TR$  tronçons, le tableau précédent à  $E$  échantillons temporels et  $3 \cdot V$  colonnes est donc transformé en un tableau à  $TR$  lignes et  $3 \cdot V$  colonnes.

Ce tableau est étudié à l'aide de l'analyse des correspondances multiples (ACM) /Escofier et Pagès, 90/.

#### IV.3.2.2 Analyse multidimensionnelle exploratoire

Rappelons que l'oculomètre a été utilisé pendant les périodes 1 et 3. Dans la perspective d'une mise en relation des données issues de ce système de mesure avec celles relatives au véhicule et à la tête, ces périodes 1 et 3 sont considérées.

##### IV.3.2.2.1 ACM portant sur toutes les variables temporelles

Chaque période contenant trois tours identiques, et chaque tour étant lui même composé de 12 tronçons, le nombre total de lignes du tableau est alors  $TR=72$ . Le nombre de colonnes correspond au nombre de fenêtres spatiales, à savoir  $3 \times 22=66$ .

La suite des valeurs propres relatives est 26%, 15%, 12%, puis des valeurs nettement plus faibles. Il importe de noter la part importante d'inertie relative du premier axe compte tenu de la grande taille du tableau (72 lignes et 66 colonnes). Ce phénomène traduit en fait l'existence de fortes relations entre les variables considérées. Le premier axe est principalement positionné par les modalités *petit* et *grand* des variables relatives à la position de la tête selon l'axe  $Z$  et à la position angulaire de la tête autour de l'axe  $Y$ , figure IV.11a. Les trajectoires relatives à ces 2 variables sont très proches et ont une forme classique - pour l'ACM - de "L" ou de "V", traduisant une relation quasi-linéaire. Ceci est confirmé par la figure IV.12a.

D'autres modalités contribuent fortement au positionnement de cet axe ; elles sont également relatives aux variables de positions linéaires et angulaires de la tête mais présentent des liaisons moins évidentes, cf. IV.12b par exemple. L'observation des positions relatives le long de l'axe 1 des points relatifs aux 72 tronçons montre une organisation non totalement aléatoire, figure IV.11b. Notamment, les points relatifs aux 12 tronçons du premier tour sont tous plus à gauche que les points relatifs aux 12 tronçons du 9ème tour. On retrouve cette tendance si l'on projette en illustratif les 6 modalités de la variable indiquant le numéro de tour, figure IV.11a ; notons alors que l'évolution selon l'axe 1 est plus marquée pour la séquence de tours 1,2, 3 que la séquence 7, 8, 9.

Compte tenu des positions relatives des fenêtres spatiales ayant le plus contribué au

positionnement de l'axe 1 et des conventions prises pour les variables, la tête a tendance à baisser et l'angle tête-tronc à s'ouvrir avec le temps. De façon à apprécier de manière plus quantitative l'influence temporelle, on propose de montrer l'évolution d'un tronçon à l'autre selon le principe suivant : D'abord, plutôt que de montrer l'évolution des 3 valeurs d'appartenance moyenne calculée tronçon par tronçon, on considère les valeurs moyennes. Le paragraphe consacré à la caractérisation a montré que cette seconde méthode est moins riche que la première, mais il s'agit ici, avant tout, de rendre le dessin synthétique. Ensuite, plutôt que de considérer des graphiques où l'axe horizontal indique les 6 tours\*12 tronçons =72 unités statistiques, on préfère utiliser des graphiques où l'axe horizontal représente les 12 tronçons et tracer les évolutions tour par tour. En effet, si le premier type de graphique permet de montrer plus directement l'évolution temporelle, il ne permet pas de rendre compte du fait que les unités statistiques n'évoluent pas de manière linéaire - on considère la séquence de tours 1, 2, 3 puis la séquence 7, 8, 9. En outre, le second type de graphique permet de comparer directement, pour un tronçon donné, les valeurs des 6 tours et donc de mieux faire apparaître un éventuel effet de périodicité (pour ne pas surcharger outre mesure les figures et rendre compte que les deux séquences de tours ne se suivent pas, on utilise 2 graphiques). D'autre part, du fait de l'intervention de l'expérimentateur sur le casque en fin de période 1 et en début de période 3, les variables traduisant les 6 positions de la tête sont centrées par rapport aux moyennes calculées pour chacune de ces périodes. La définition de la variable étant en quelque sorte modifiée, il est donc préférable de considérer un graphique pour chaque période.

Les figures IV.13a et b montrent de tels graphiques pour la position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y et la position linéaire de la tête (on rappelle que les signaux relatifs aux mouvements de la tête ont été centrés autour de leurs moyennes respectives). Ces graphiques confirment les résultats mis en exergue par l'ACM, notamment :

- 1) L'influence du *facteur temps* est manifeste mais est plus marquée pour la séquence de tours 1,2, 3 que la séquence 7, 8, 9.
- 2) L'influence du *facteur tronçon* est peu marquée. L'interprétation sur un plan biomécanique de ces figures et du premier résultat issu de l'ACM est qu'au fil des tours le conducteur a tendance à s'enfoncer dans le siège, ce qui nécessite un redressement de la tête afin de garder une même visibilité. Outre cette évolution temporelle, l'axe 1 montre une tendance à se déplacer vers le centre du véhicule. L'observation des enregistrements vidéo confirme le *tassement* dans le siège.

L'axe 2, qui traduit une dispersion deux fois moindre que l'axe 1, est également essentiellement positionné par les variables relatives aux positions de la tête mais aussi par la vitesse du véhicule. Alors que pour l'axe 1 les évolutions temporelles vont dans le même sens pour les deux séquences de tours, elles sont inversées pour l'axe 2. Par exemple, la position angulaire par rapport à l'axe X a plutôt tendance à augmenter pour la séquence de tours 1, 2, 3 et à baisser pour la séquence 7, 8, 9 ; cette tendance se confirme par la figure IV.14. Notons alors que l'influence du facteur tronçon est nettement plus marquée pour cette variable que pour les variables qui contribuent à positionner l'axe 1. Par exemple le tronçon 11, qui est le virage à gauche le plus serré, génère pour les 6 tours une rotation de la tête très négative (vers la gauche avec nos conventions de signe).

L'axe 3 est, comme les deux précédents, essentiellement positionné par les variables relatives aux positions de la tête et plus particulièrement aux positions linéaires selon les axes X et Y. Cette prédominance du positionnement de la tête quant à la construction des premiers axes traduit en fait deux phénomènes importants : l'influence du facteur temps et l'influence du facteur type de tronçon. Notons alors que ces influences se situent essentiellement sur le plan biomécanique.

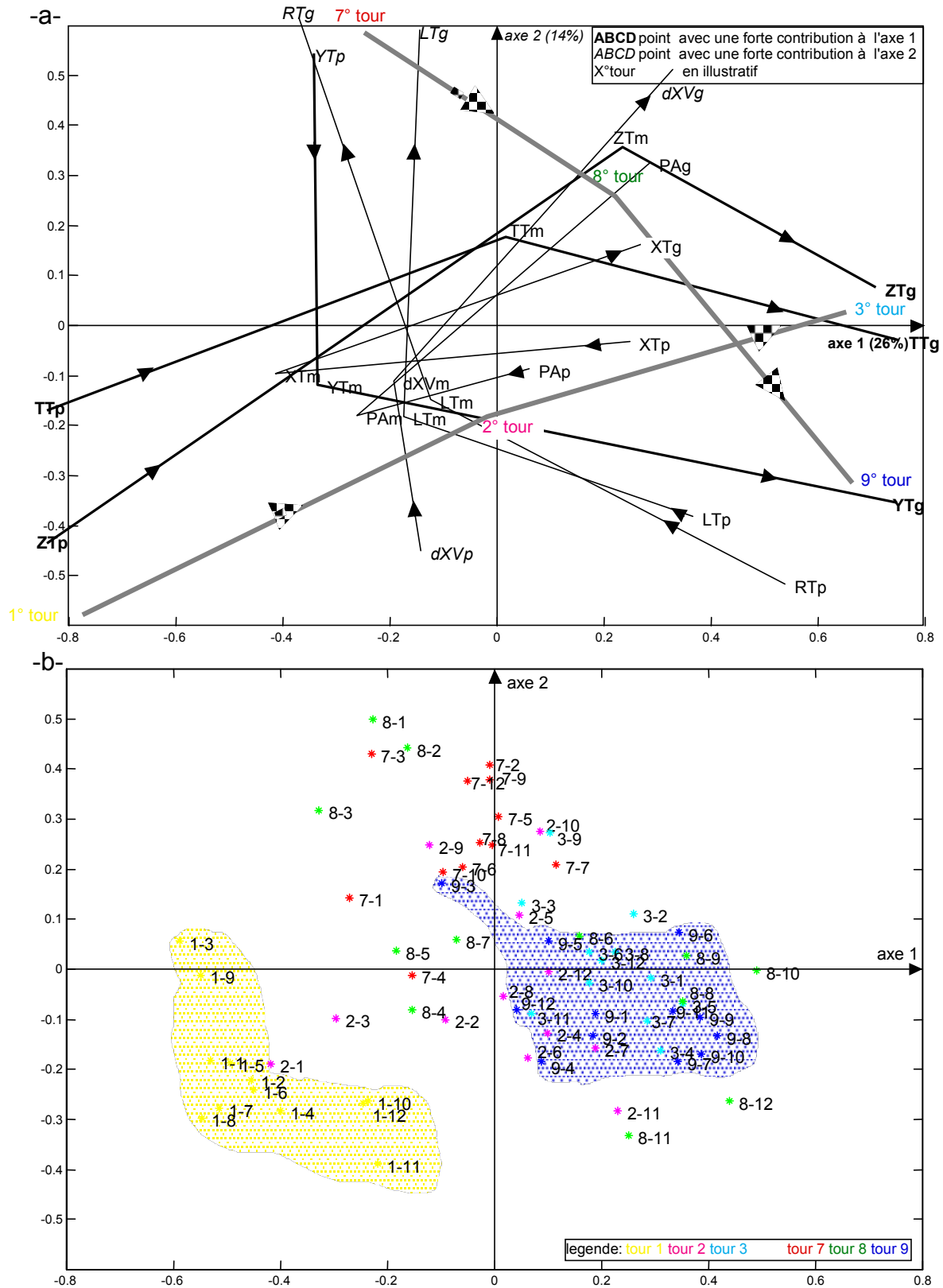


Figure IV.11 : Premier plan issu de l'ACM de toutes les variables relatives à la voiture et à la tête ; a) projection des points correspondant aux 66 fenêtres spatiales (uniquement les variables possédant les modalités avec les plus fortes contributions sont montrées) ; b) projection des points correspondant aux 76 tronçons.

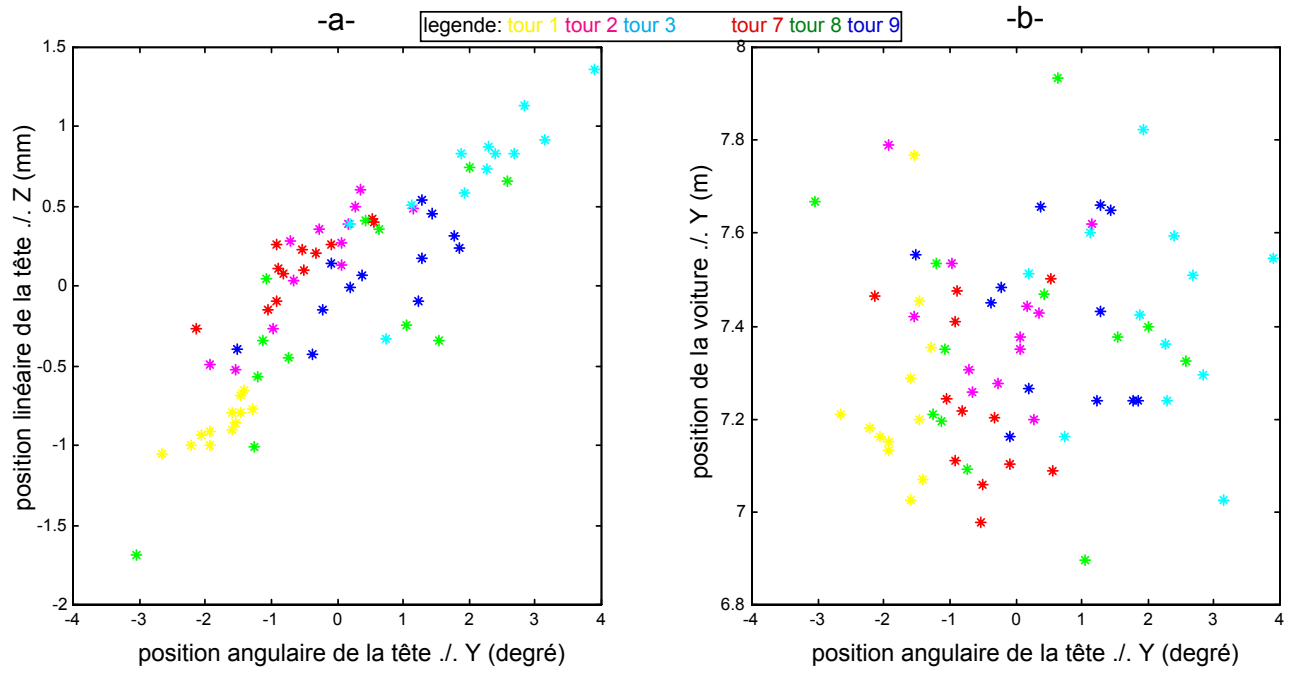


Figure IV.12 : Diagrammes de dispersion ; a) position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y et position linéaire de la tête le long de l'axe Z ; b) position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y et position latérale de la voiture (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon).

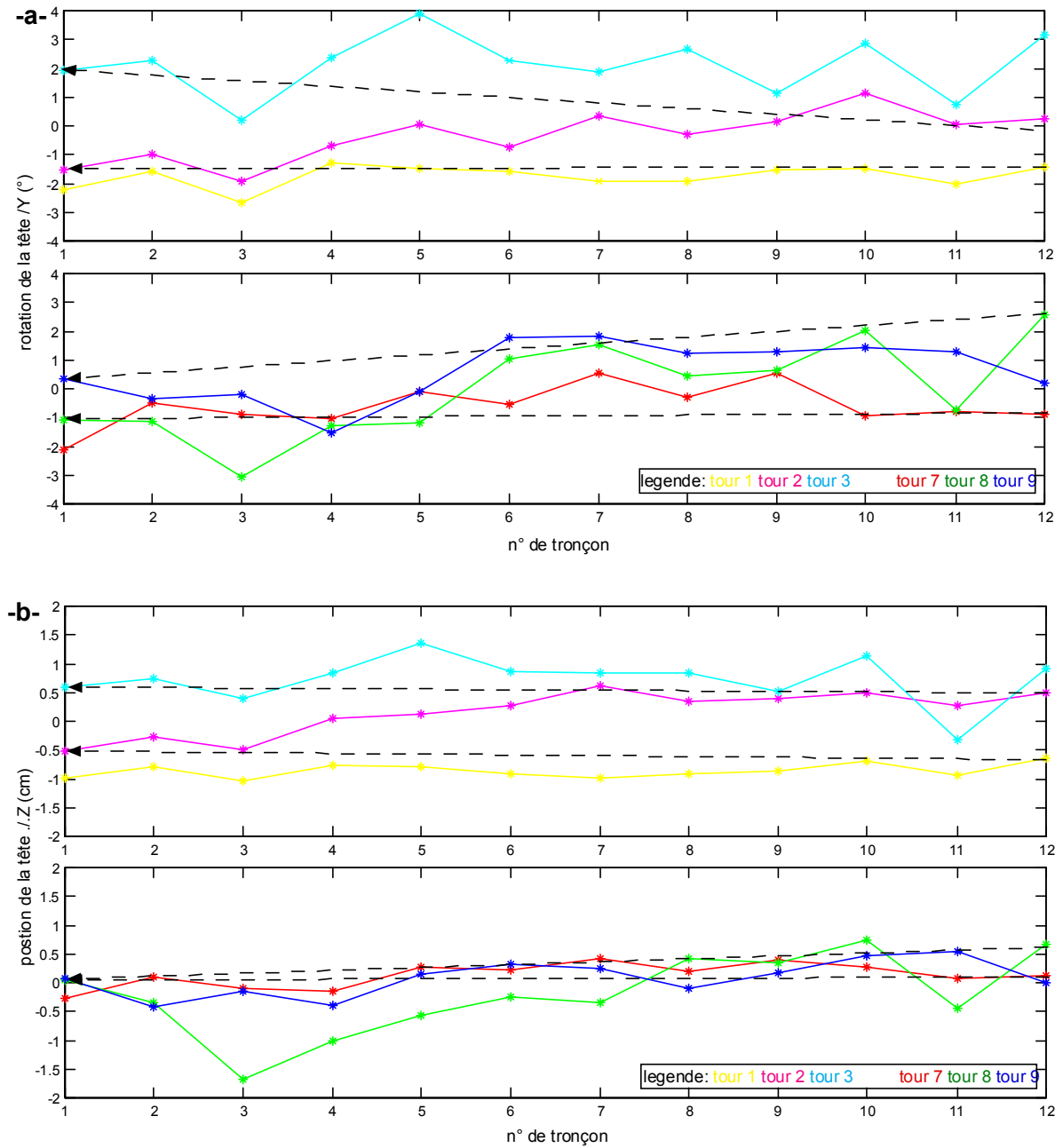


Figure IV.13 : Diagrammes d'évolution tour par tour ; a) position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y ; b) position linéaire de la tête le long de l'axe Z.



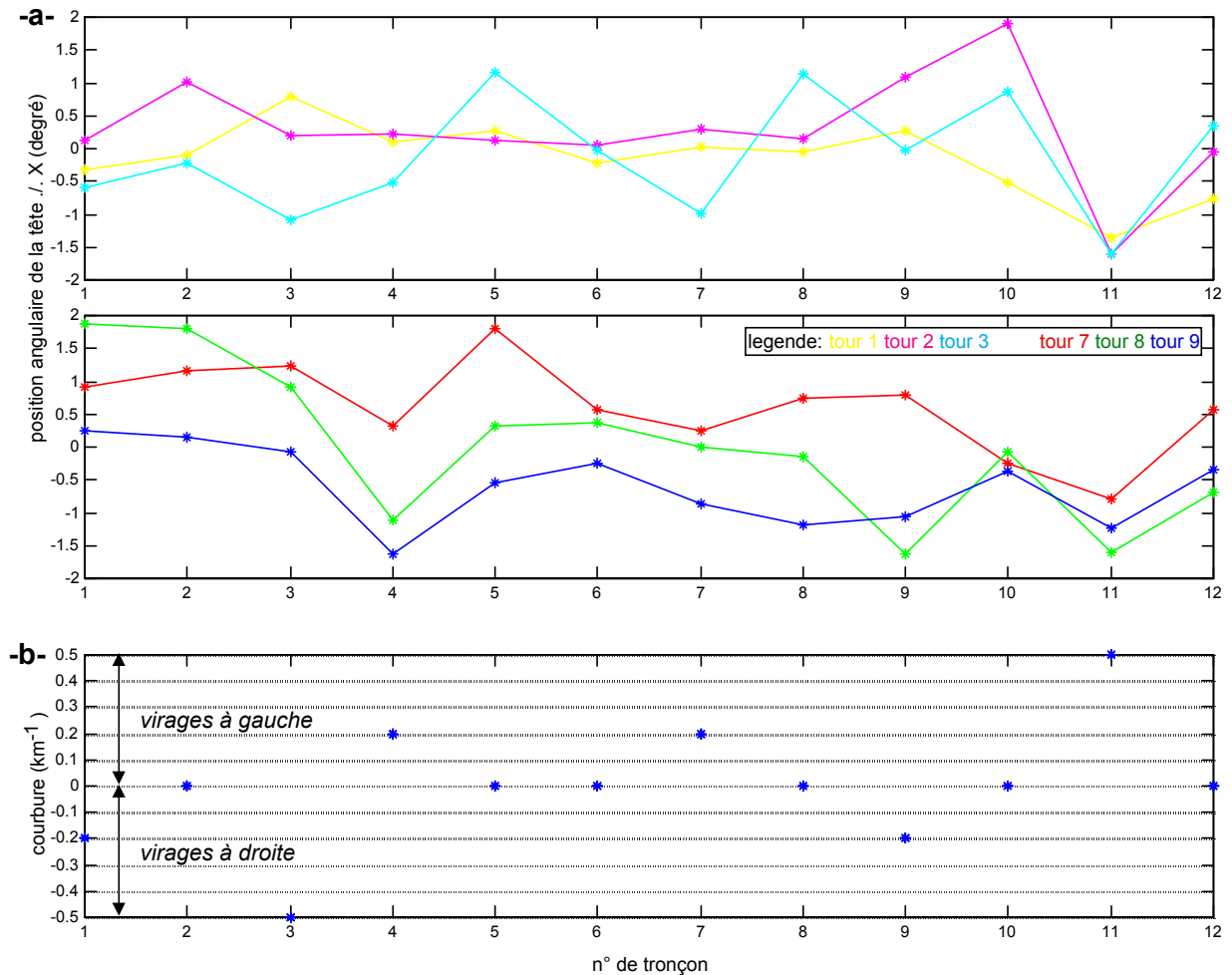


Figure IV.14 : Diagramme d'évolution tour par tour de la position angulaire de la tête par rapport à X.

En raison de l'importance de cet aspect biomécanique, les variables relatives aux positions linéaires et angulaires de la tête ont été retirées de l'analyse. Il reste alors  $V=16$  variables.

#### IV.3.2.2.2 ACM avec suppression des variables relatives aux positions de la tête

Le tableau considéré croise les 72 tronçons (lignes) et les  $3 \times 16 = 48$  modalités spatiales (colonnes). La suite des valeurs propres relativisées et triées dans l'ordre décroissant est 28%, 23%, 15%, 10%, puis des valeurs nettement plus faibles.

L'axe 1 est essentiellement contrôlé par la vitesse du véhicule ; vient ensuite la position de la pédale d'accélérateur. Comme avec l'axe 1 de l'ACM précédente, on note l'influence du temps - la vitesse a tendance à augmenter - mais cette influence est nettement moins manifeste.

L'axe 2 traduit la relation entre le couple et l'angle au volant. Si cette relation peut paraître logique, voire triviale, le fait qu'elle n'apparaisse qu'au niveau du deuxième axe de la deuxième ACM pourrait signifier qu'elle est moins "forte" que celle entre la position linéaire de la tête selon l'axe Z et la position angulaire de la tête autour de l'axe Y ; donc qu'un phénomène relationnel a priori évident sur le plan mécanique est moins présent qu'un phénomène biomécanique découvert a posteriori. Mais l'observation des données montre qu'il n'en est rien ; en fait, compte tenu que 1) le circuit est une suite de tronçons en ligne droite et en virage, mais avec des rayons de courbure

constants, et 2) la caractérisation est effectuée en moyennant les valeurs d'appartenances tronçon par tronçon, il s'avère que les indicateurs de l'angle au volant, comme le couple exercé sur le volant, ne varient pas de manière continue. La figure IV.15a, construite en considérant les moyennes tronçon par tronçon, confirme ceci. Il s'avère donc que, sur le plan purement statistique, l'ACM donne des résultats tout à fait cohérents avec le tableau de données considéré.

L'axe 3 est à nouveau essentiellement positionné par la vitesse de la voiture et la position de la pédale d'accélérateur, montrant donc que le lien entre ces deux variables ne se réduit pas à une simple relation linéaire.

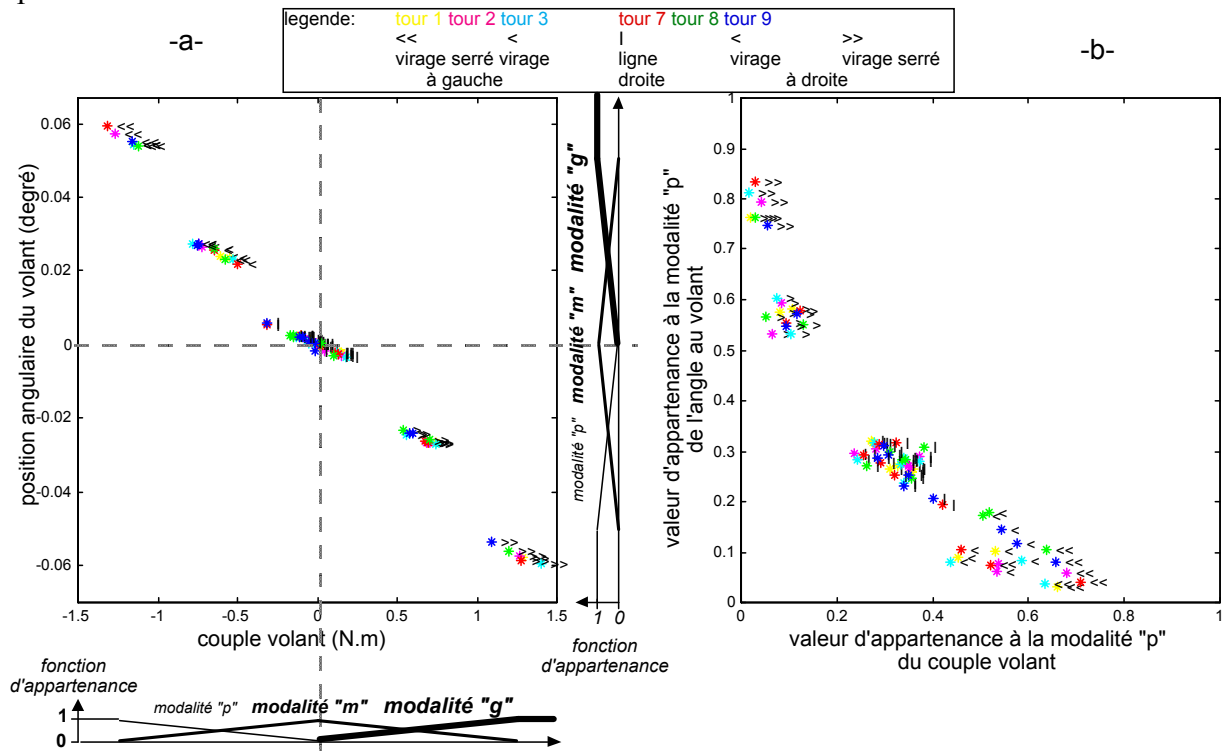


Figure IV.15 : Diagrammes de dispersion ; a) couple et angle volant ; b) valeurs d'appartenance à la modalité "petit" pour ces deux variables (les valeurs considérées pour ces deux graphiques sont des moyennes calculées tronçon par tronçon).

Les résultats trouvés jusqu'à présent traduisent essentiellement les relations entre des variables dites de base (vitesse, position, couple, ...). Ces relations peuvent s'expliquer par l'influence du facteur temps (traduit ici par le numéro de tour) et/ou du facteur tronçon. Il est donc à noter que les variables traduisant le niveau d'activité gestuelle sont (quasi) absentes dans la construction des axes. L'ACM qui suit propose une étude de ces variables.

#### IV.3.2.2.3 ACM portant uniquement sur les variables traduisant le niveau d'activité gestuelle

Les variables considérées traduisent les mouvements latéraux (**dYV**), l'activité gestuelle de la tête (6 variables : **dXT**, **dYT**, **dZT**, **dRT**, **dTT** et **dLT**), l'activité au niveau de la pédale d'accélérateur (**dPA**) et au niveau du volant (**dAO** et **dCO**). Rappelons que ces variables sont obtenues en considérant la valeur absolue de la dérivée des signaux de base. Le tableau considéré croise les 72 tronçons et les  $3 \times 10 = 30$  modalités spatiales. Le pourcentage d'inertie exprimé par le premier axe est nettement supérieur aux valeurs suivantes : 59% par rapport à 14%, 10% et 5% pour les axes 2 à 4.

L'axe 1, qui traduit donc à lui seul plus de la moitié de la dispersion du nuage initial, est principalement positionné par la modalité *grand* et *petit* des variables relatives à l'activité gestuelle de la tête, figure IV.16a. Cette figure et celle relative aux points représentant les tronçons montrent, qu'au fil des tours, l'activité gestuelle de la tête augmente. La figure IV.17 illustre ceci pour deux variables.

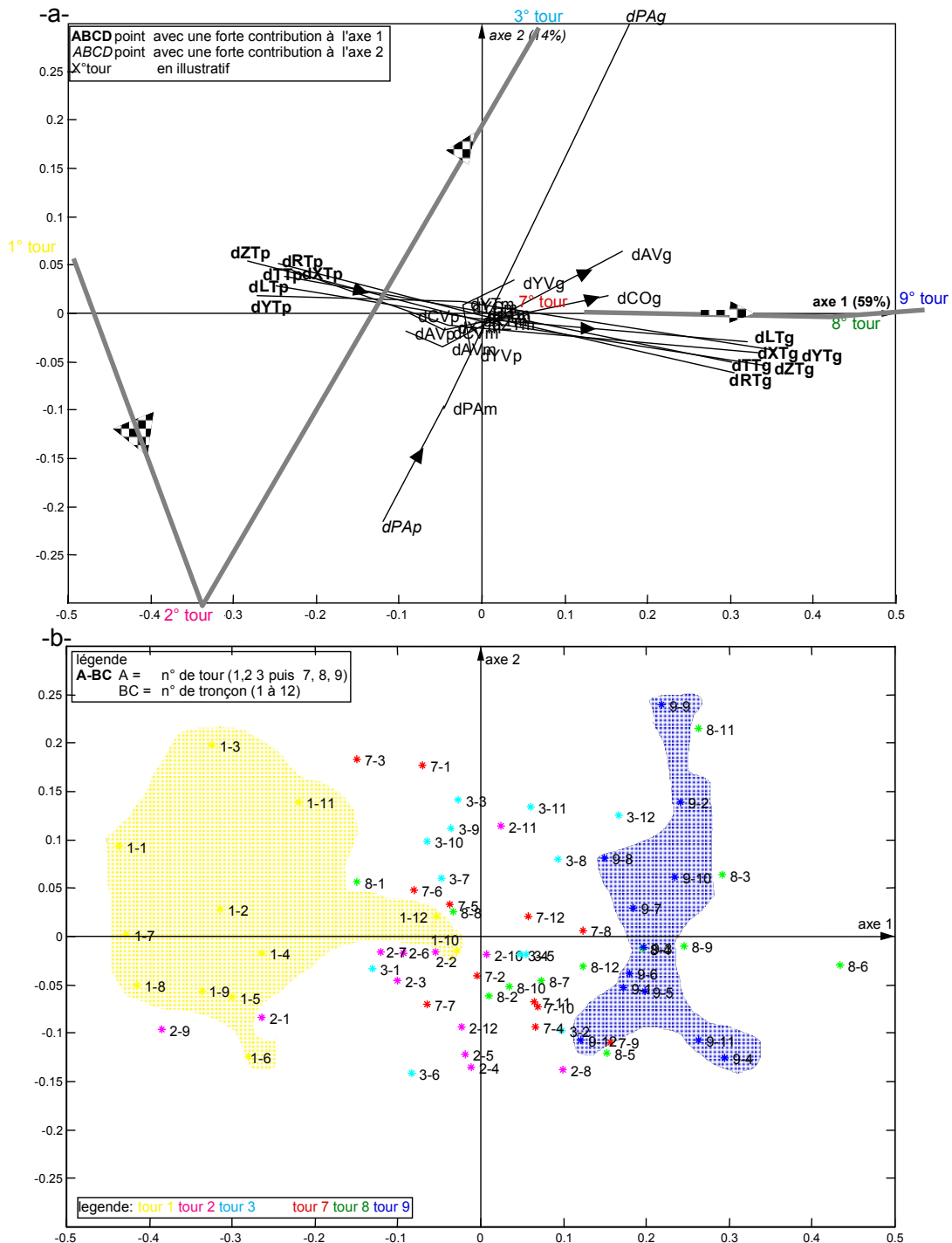


Figure IV.16 : Premier plan issu de l'ACM des variables relatives à l'activité gestuelle ; a) projection des points correspondant aux 30 fenêtres spatiales (uniquement les variables possédant les modalités avec les plus fortes contributions sont montrées) ; b) projection des points correspondant aux 76 tronçons.

L'axe 2 est quasiment contrôlé par la variable traduisant le mouvement de la pédale d'accélérateur, la modalité *petit* ayant une contribution quatre fois moindre que la modalité *grand*. Cet axe traduit l'évolution au cours des deuxième et troisième tours. Notamment, les points représentant les tronçons 7 à 12 présentent des coordonnées selon l'axe 2 plus grandes que les tronçons précédents. Ceci est confirmé par la figure IV.18. En outre, cette figure montre qu'au fil des tours la dispersion de l'activité gestuelle évolue en augmentant.

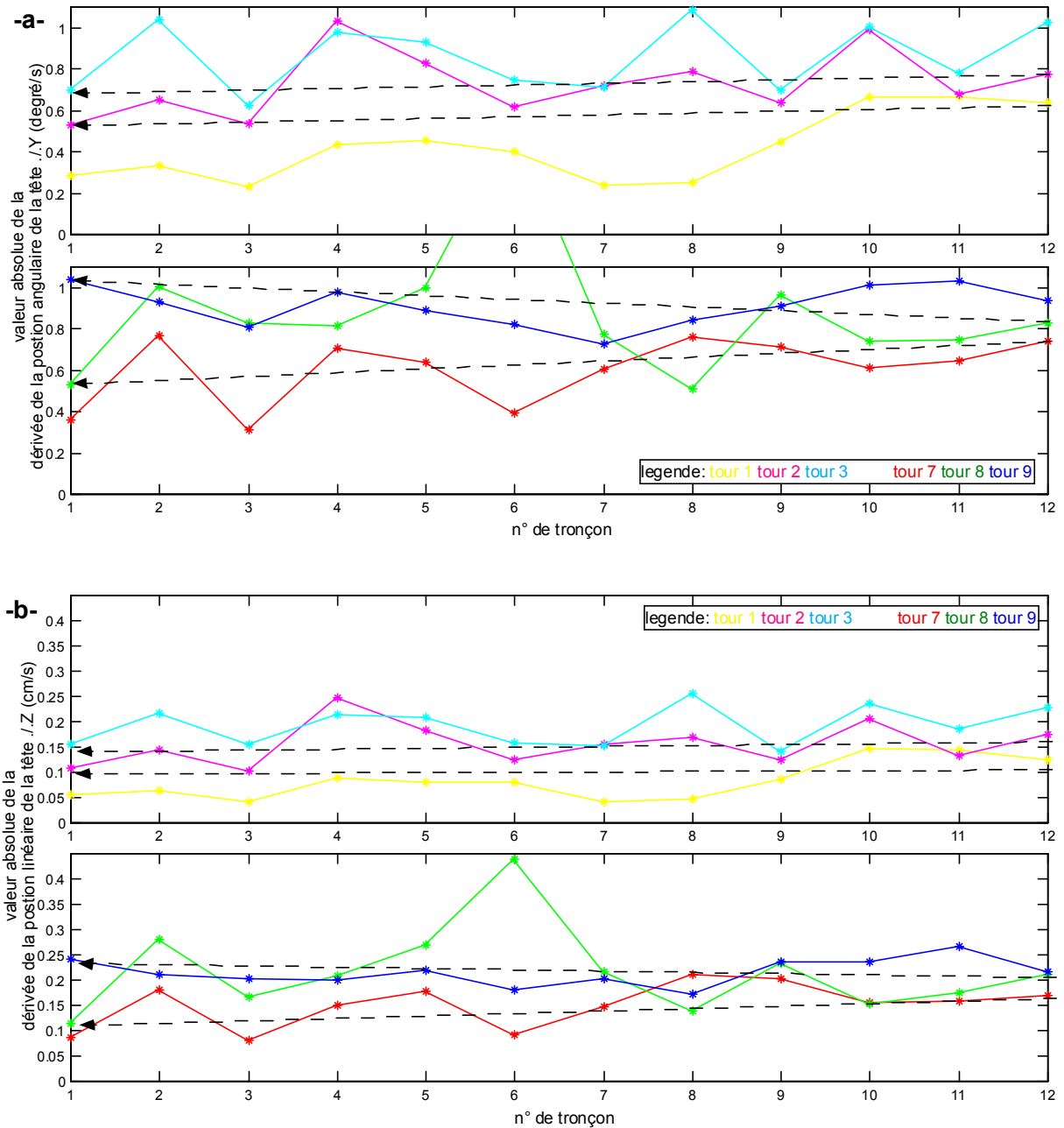


Figure IV.17 : Diagrammes d'évolution tour par tour ; a) valeur absolue de la dérivée de la position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y ; b) valeur absolue de la dérivée de la position linéaire de la tête le long de l'axe Z.

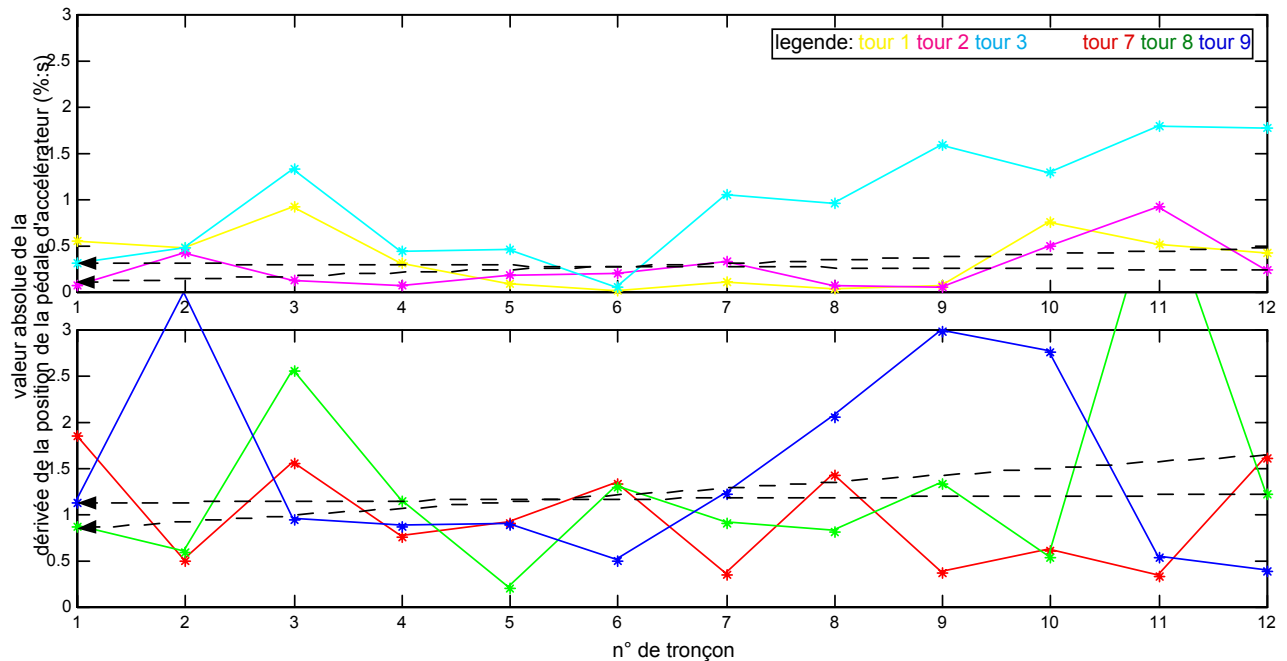


Figure IV.18 : Diagrammes d'évolution tour par tour ;  
 a) valeur absolue de la position angulaire de la tête par rapport à l'axe Y ;  
 b) valeur absolue de la position linéaire de la tête le long de l'axe Z.

On retiendra de ces différentes analyses l'importance des variables décrivant la position et les mouvements de tête. Notamment, il semblerait qu'avec le temps le conducteur ait tendance à glisser dans le siège. En outre, il apparaît que le conducteur bouge de plus en plus.

### IV.3.3 Analyse des données oculaires

Rappelons que l'oculomètre a été utilisé pendant les périodes 1 et 3.

#### IV.3.3.1 Caractérisation

Les problèmes posés par la caractérisation sont très différents des précédents dans la mesure où le système oculomoteur présente des mouvements très spécifiques. Les données fournies par l'oculomètre sont transformées après filtrage en une succession de quatre "entités" de base : les *fixations*, les *mouvements lents*, les *saccades* et les *clignements de paupières*. En outre, les dysfonctionnements éventuels du capteur ont nécessité la prise en compte d'une cinquième entité : *autres*.

Ensuite se pose le problème de la caractérisation de chacune de ces 5 entités en termes d'indicateurs d'aspects temporels (au sens de *durée* et de *chronologie*) et spatiaux.

#### Aspects temporels :

Rappelons que dans la perspective de la mise en relation des données oculaires avec les données précédentes, l'unité temporelle de base est une fenêtre temporelle contenant un tronçon soit 72 fenêtres en tout (3 "tours" x 12 tronçons x 2 phases). L'aspect chronologique est donc l'étude de l'évolution au cours des tronçons, eux-mêmes étant regroupés en tours.

Au niveau de l'aspect *durée*, on peut retenir la durée proprement dite (durée des *fixations*,

*mouvements lents, saccades, et clignements de paupières*) ou introduire une notion de fréquence ou de période. Il est évident que ces trois notions ne sont pas indépendantes et qu'elles peuvent être considérées en absolu ou en relatif. Considérons par exemple la fixation comme entité et la fréquence comme indicateur que l'on souhaite retenir. On peut alors calculer le nombre de fixations par unité temporelle (la minute par exemple) ou relativiser dans une unité temporelle donnée le nombre de fixations par rapport au nombre total d'entités, i.e le taux de *fixations, mouvements lents, saccades, et clignements de paupières*. A titre illustratif, la figure IV.19 donne l'évolution du nombre de fixations, de mouvements lents et de clignements de paupières par tronçon.

On constate alors que certains effectifs ne sont pas pas totalement indépendants ; par exemple, les courbes d'évolution des effectifs de fixations sont très proches de celles des saccades (courbes non montrées) ; par ailleurs, certains effectifs évoluent de manière non aléatoire avec le temps, par exemple le nombre de clignements de paupière a tendance à augmenter au fil des tours.

Plus globalement, retenons que :

- les fixations représentent 41% des entités oculométriques clairement identifiées ;
- les saccades 43% ;
- les mouvements lents 7% ;
- les clignements de paupière 6%.

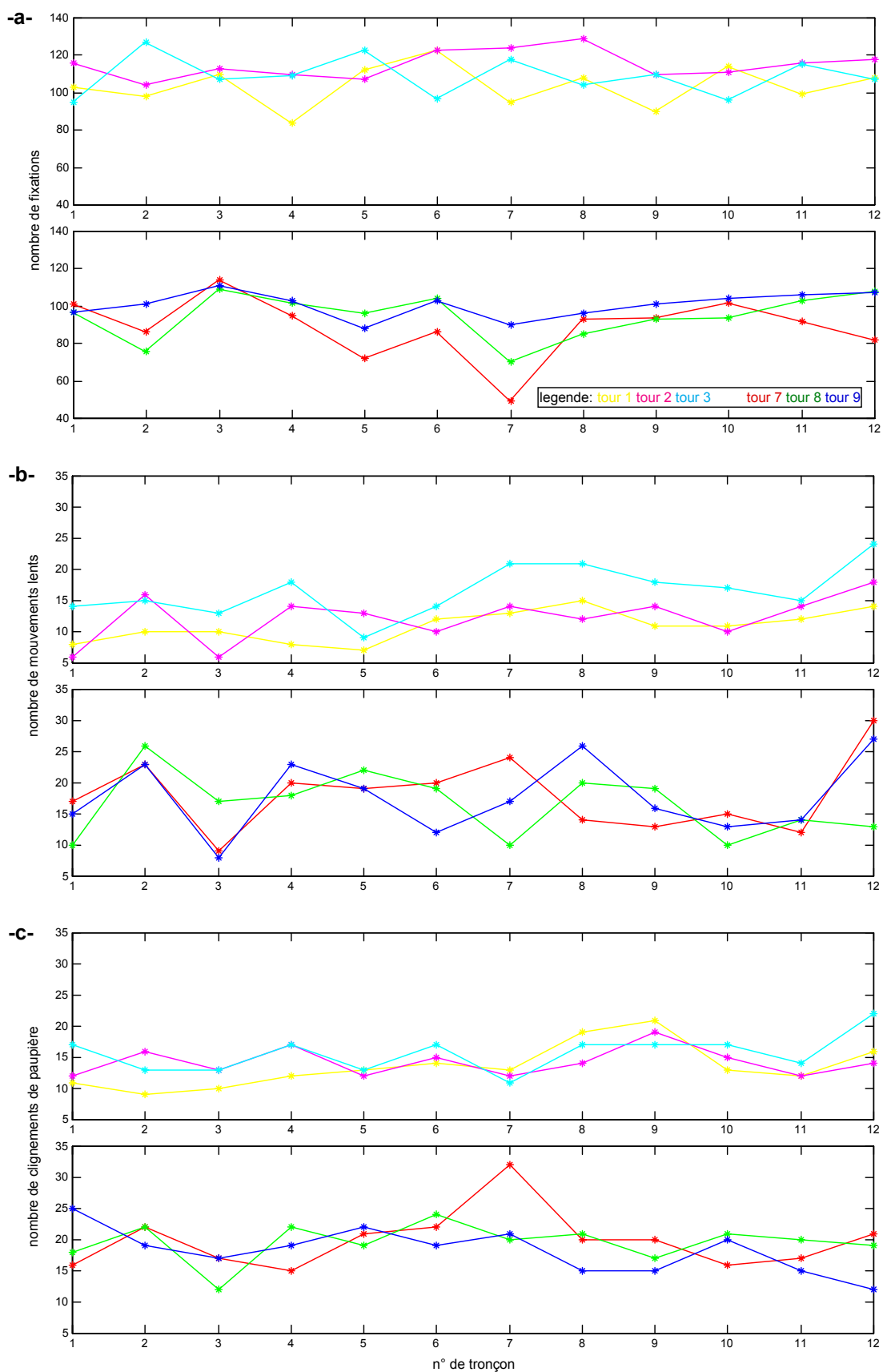


Figure IV.19 : Nombre d'entités oculométriques par tronçon ; a) fixations ; b) mouvements lents ; c) clignements de paupières.

Ces remarques étant faites, conscients de la diversité dans la façon de caractériser, on préfère retenir la durée proprement dite (des *fixations*, *mouvements lents*, *saccades*, et *clignements de paupières*) car elle semble plus à même de rendre compte d'aspects physiologiques, une variable comme le nombre d'occurrences étant d'avantage d'ordre statistique. Comme avec les données précédentes, la durée est découpée en 3 classes floues telles que les valeurs d'appartenances moyennes sont quasi-identiques. La figure IV.20 fournit les histogrammes relatifs aux 5 variables traduisant la durée ainsi que les fonctions d'appartenance. Notons que les distributions sont très éloignées de la courbe de Laplace-Gauss, ce qui montre, une fois de plus, l'inaptitude de la moyenne à caractériser un ensemble de valeurs de durées.

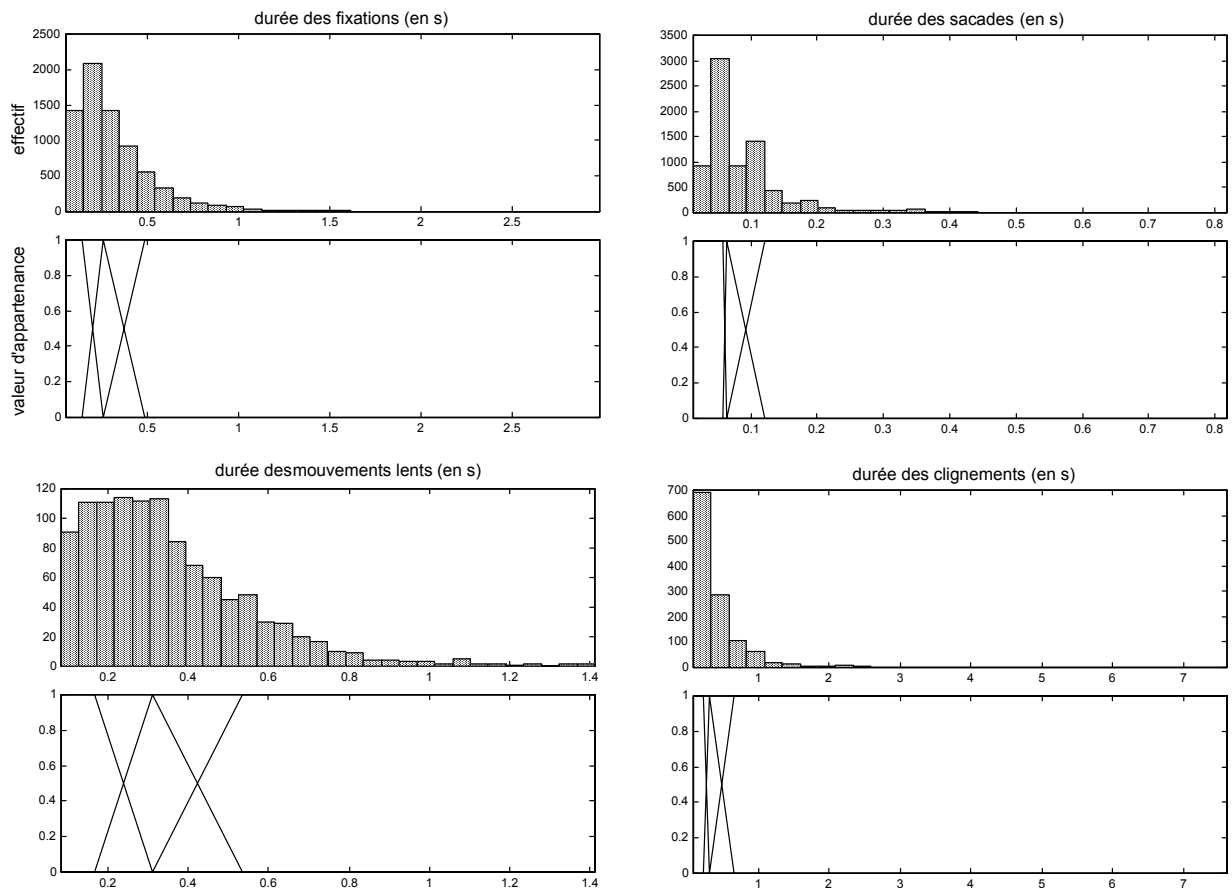


Figure IV.20 : Quelques exemples d'histogrammes de durées et de découpages correspondants (l'histogramme est construit à partir des valeurs relatives aux périodes 1 et 3 (7343 fixations, 1104 mouvements lents, 7630 saccades et 1215 clignements de paupières).

#### Aspect spatiaux :

Il faut distinguer les 5 types d'entités (*fixations*, *mouvements lents*, *saccades*, et *clignements de paupière*).

Concernant la fixation et le mouvement lent, la caractérisation doit avant tout aboutir sur l'indication de l'objet observé. Une première classification consiste à distinguer :

- les petits objets : panneau d'indication, téléphone d'urgence, construction, arbre, ...
- les grands objets qui constituent le "fond" de l'image : la route, le paysage, le ciel, le panorama (collines situées en arrière plan), ...



La détermination de l'objet regardé est réalisée par le logiciel RAYPLAY (décrit au § II.2.1).

Une analyse approfondie des objets renvoyés par ce logiciel et du comportement oculaire montre qu'une classification aussi "brutale" ne suffit pas. En premier lieu, il est "abusif" de prétendre que l'objet renvoyé est effectivement celui regardé, compte-tenu des aspects de vision centrale - vision périphérique et de l'incertitude de la mesure (environ  $1^\circ$ ). En second lieu, il se dégage une zone fortement regardée et qui ne correspond pas à un objet bien précis : c'est la zone correspondant à la convergence des deux bords de la route ("point d'expansion" dans le cas d'une ligne droite, "point de corde" dans le cas d'un virage).

Ces deux remarques nous ont conduit à ajouter une nouvelle zone à la classification précédente et à retenir des limites *floues* entre certaines zones /Loslever, 96/. Le principe de découpage spatial flou est illustré figure IV.21 pour le cas de la zone de convergence. Les intervalles d'hésitation  $i_x$  et  $i_y$  sont choisis en fonction de l'incertitude de mesure (1 degré à 3,50 mètres donne une valeur de 6 centimètres) et les dimensions de la zone où la valeur d'appartenance vaut 1 tiennent compte des fluctuations du positionnement oculaire ( $l_x = 48$  cm et  $l_y = 24$  cm).

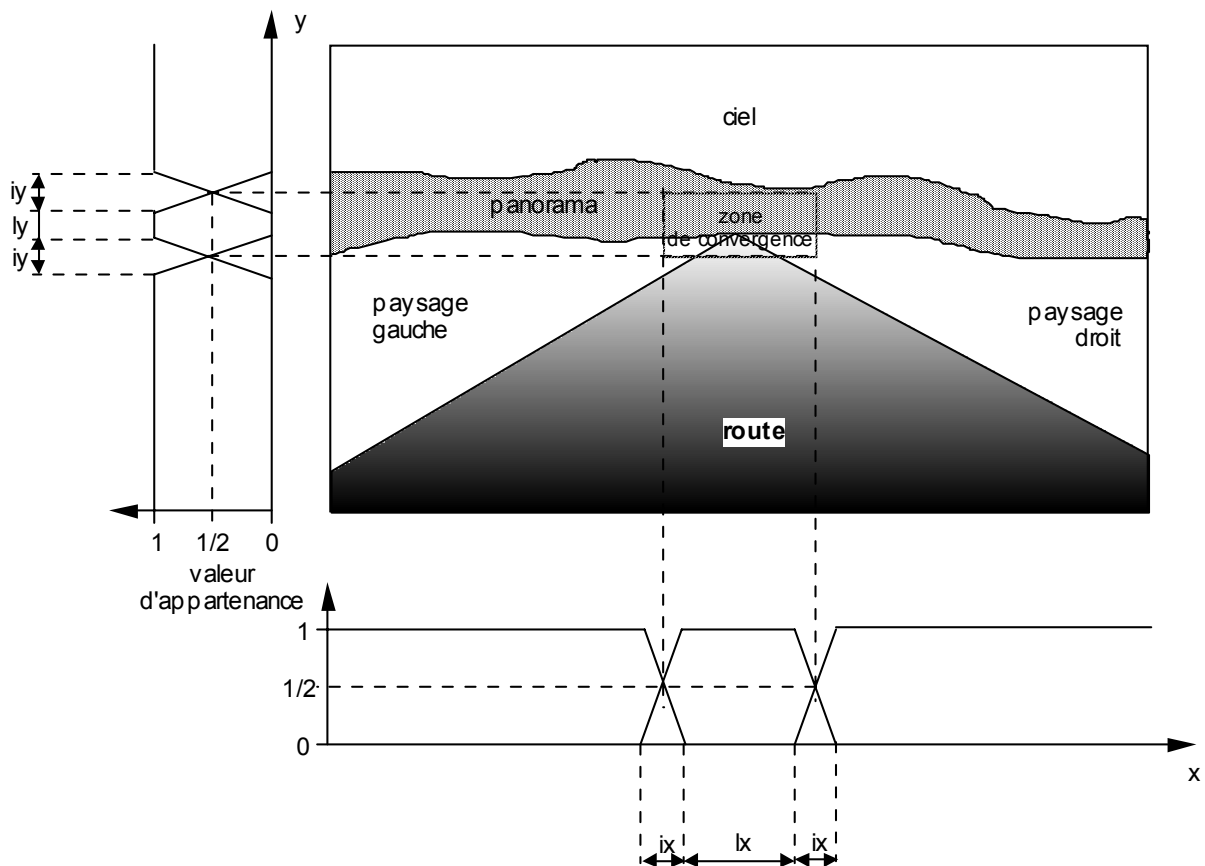


Figure IV.21 : Principe du découpage flou pour la zone de convergence.

Notons, dans la perspective de rester dans un contexte statistique, que la somme des valeurs d'appartenance doit être égale à 1. Par exemple, pour une fixation  $f_i$  de coordonnées  $(x(f_i), y(f_i))$  et des fonctions d'appartenances aux axes horizontal et vertical respectivement  $X$  et  $Y$ , la condition s'obtient de la façon suivante :

$$\sum_{x=1}^X \mu_x(x(f_i)) = 1 \text{ et } \sum_{y=1}^Y \mu_y(y(f_i)) = 1 \quad (1),$$

sont des propriétés des X+Y fonctions d'appartenance monodimensionnelles puis

$$\mu_{z=x \cap y}(x(f_i), y(f_i)) = \mu_x(x(f_i)) * \mu_y(y(f_i)) \quad (2),$$

est une propriété de chacune des Z=X\*Y fonctions d'appartenance bidimensionnelles, et donc

$$\sum_{z=1}^Z \mu_z(x(f_i), y(f_i)) = 1 \quad (3)$$

Si les zones ne sont pas incluses dans une surface rectangulaire dont les arêtes sont parallèles aux axes, il est relativement difficile de respecter cette condition (3). En conséquence, la procédure de calcul de la valeur d'appartenance à une zone z de forme quelconque est la suivante :

- 1) la zone est considérée comme la juxtaposition de sous zones, ce qui nécessite un découpage des axes horizontal et vertical en adoptant des largeurs  $l_x$  et  $l_y$  très petites et en respectant l'équation (1) ;
- 2) on effectue ensuite l'addition des valeurs d'appartenance des sous-zones pour donner la valeur d'appartenance à la zone z considérée.

A titre illustratif, la figure IV.22 donne la valeur d'appartenance moyenne aux zones considérées dans notre étude.

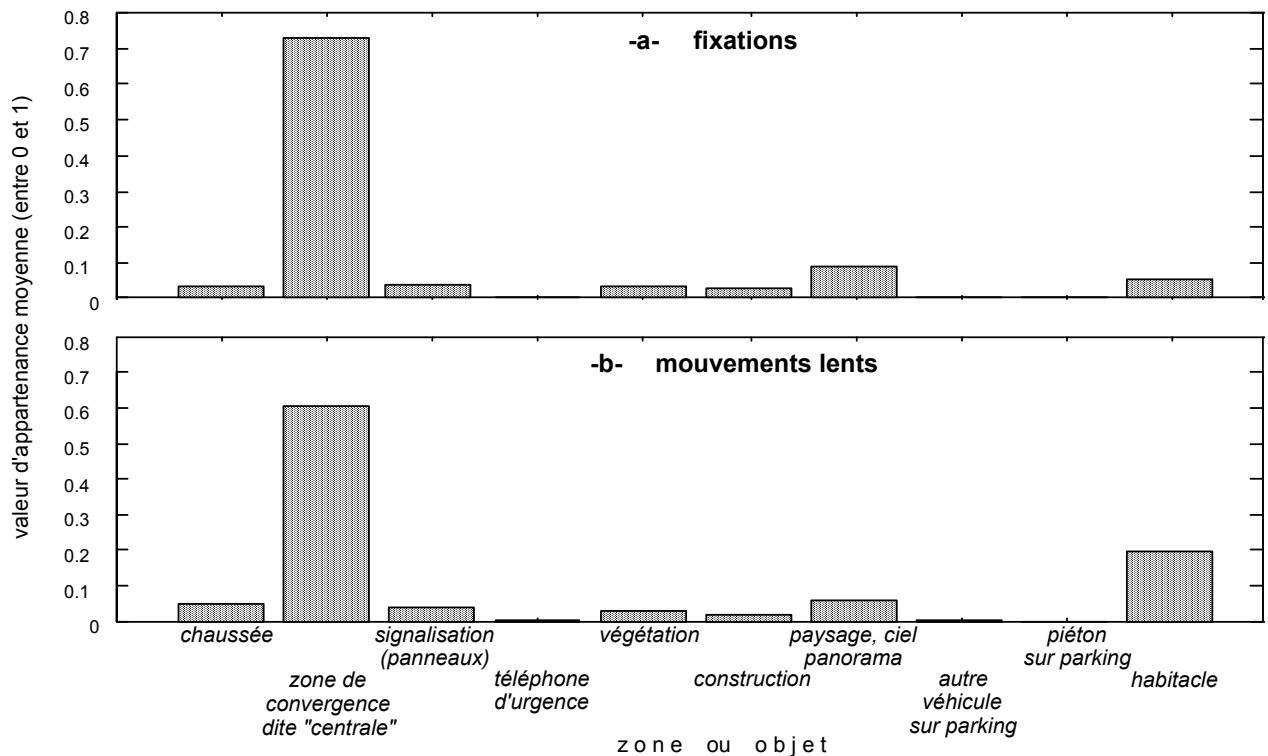


Figure IV.22 : Valeurs d'appartenance moyennes aux 10 zones considérées dans notre étude ; a) cas des fixations ; b) cas des mouvements lents.

Cette figure nécessite deux remarques. La première est relative à la zone la plus regardée, à savoir celle où les bords gauche et droit de la route se rejoignent. Notons que cette zone n'est pas celle de plus grande surface (environ 5 % de la surface totale de l'écran) et que cette surface reste

constante tout au long du parcours. Comme c'est le cas en conduite réelle sur route plane, elle est située environ à l'horizontale de l'oeil.

La seconde remarque porte sur les valeurs d'appartenance les plus faibles, voire nulles, comme le téléphone d'urgence, le piéton ou la voiture sur le parking. Précisons alors que le nombre d'occurrences de ces objets est faible, voire nul, et que leur taille varie fortement.

Le second aspect spatial pris en compte est relatif à la dispersion des écarts angulaires à l'intérieur d'une fixation, d'un mouvement lent et d'une saccade. Il s'agit de calculer, pour chaque entité, la somme des écarts angulaires entre deux échantillons consécutifs. Remarquons que dans le cas d'une saccade oculaire, cet indicateur s'apparente à la notion d'amplitude.

En définitive, les variables retenues sont données dans le tableau IV.23 ci-après :

<i>Signification</i>	<i>Sigle de la variable</i>	<i>Unité</i>
Durée de la Fixation	<b>DFY</b>	secondes
valeur d'appartenance à la Zone pointée durant la Fixation	<b>ZFY</b>	entre 0 et 1
Somme des écarts angulaires pour la Fixation	<b>SFY</b>	dégrés
Durée du mouvement Lent	<b>DLY</b>	secondes
valeur d'appartenance à la Zone pointée durant le mouvement Lent	<b>ZLY</b>	entre 0 et 1
Somme des écarts angulaires pour le mouvement Lent	<b>SLY</b>	dégrés
Durée de la Saccade	<b>DSY</b>	secondes
Somme des écarts angulaires pour la Saccade	<b>SSY</b>	dégrés
Durée du Clignement de paupières	<b>DCY</b>	secondes

Tableau IV.23 : Variables de base ; la lettre Y désigne les Yeux, T la Tête, V le Véhicule et O le Volant.

La procédure de caractérisation est nettement plus complexe que celle utilisée pour les signaux relatifs à la tête et à la voiture. Résumons la de façon synthétique :

- 1) pour les périodes 1 et 3 durant lesquelles l'oculomètre est utilisé, détermination des différentes entités oculaires : fixations, mouvements lents, saccades, clignements de paupières et autres ;
- 2) pour chaque entité trouvée, calcul des 9 variables temporelles du tableau IV.23 ; notons alors que :
  - les variables ne sont pas identiques pour les 5 entités oculaires et,
  - les variables ne répondent pas aux mêmes modèles d'échelles de mesure : les 2 variables indiquant la zone regardée (au cours d'une fixation ou d'un mouvement lent) répondent au modèle *qualitatif nominal*, les autres au modèle *quantitatif* ;
- 3) pour chaque entité oculaire et chaque variable quantitative, on calcule les valeurs d'appartenance aux 3 fenêtres (ou modalités) spatiales (les variables qualitatives étant déjà codées selon 10 modalités) ;
- 4) pour les entités oculaires tombant dans un même tronçon, calcul de la valeur d'appartenance moyenne (VAM) aux différentes modalités spatiales considérées ;
- 5) rangement des VAM dans un tableau à 72 lignes (chaque période contenant trois tours identiques, chaque tour étant lui-même composé de 12 tronçons) et de 41 colonnes (7x3=21 fenêtres pour les variables initialement quantitatives et 2x10=20 fenêtres pour les variables indiquant la zone).

#### IV.3.3.2 Analyse multidimensionnelle exploratoire

Rappelons que la métrique utilisée dans l'ACM est celle du khi-deux, faisant intervenir l'inverse des fréquences (ici l'inverse des VAM) dans la comparaison des lignes et la comparaison des colonnes. Ceci a justifié en partie le fait de privilégier un découpage à effectifs égaux. Or, l'observation des histogrammes durant l'étape de caractérisation a montré que certaines zones sont peu regardées, soit parce qu'elles sont très petites, soit parce qu'elles contiennent des éléments apparaissant très rarement (individu ou voiture sur un parking). On peut donc penser que les modalités correspondant à ces zones risquent de perturber l'ACM. Néanmoins, une première analyse sera faite en les considérant.

##### IV.3.3.2.1 ACM portant sur toutes les modalités des variables temporelles

Le tableau ici considéré croise donc les 72 tronçons avec les 41 modalités spatiales des 9 variables du tableau IV.23. Notons que pour les fixations et mouvements lents, les effectifs relatifs à la zone *individu* sont nuls (il en est donc de même pour les poids de ces deux modalités).

Le premier axe présente une inertie relative nettement plus élevée que les suivants (15,5% par rapport à 11,1%, 10,9%, 8,8% ...). L'observation des indicateurs de contributions relatives montre que cet axe est principalement positionné par les modalités *grand* puis *petit* de la variable relative à la durée des clignements des yeux (**DCY**). Apparaissent ensuite, mais de façon nettement moindre, la modalité *grand* de la variable traduisant l'amplitude des saccades (**SSY**), puis la modalité (*paysage, ciel, panorama*) de la variable zone pour les fixations (**ZFY**) et la modalité *poste téléphonique d'urgence* pour les mouvements lents (**ZLY**). Rappelons que cette modalité est extrêmement rare, il en est de même pour celle relative à la zone *voiture* pour les mouvements lents, qui contribue essentiellement au positionnement l'axe 2. Le risque de perturbation évoqué précédemment est donc manifeste. Avant de reconsidérer l'ACM en supprimant les modalités d'effectifs très faibles, deux remarques sont alors à formuler concernant les modalités à fortes contributions :

Remarque 1 : L'observation des positions relatives des points représentant les tronçons montre que les variables traduisant la durée des clignements de paupière et l'amplitude des saccades semblent varier de manière monotone avec le temps : elles semblent être plus grandes à la fin de la période 3 qu'au début de la période 1.

Remarque 2 : L'observation des positions relatives des points représentant les modalités montre que la zone *poste téléphonique d'urgence* pour les mouvements lents est très excentrée le long de l'axe 1 et que la zone *voiture* pour les mouvements lents est très excentrée le long de l'axe 2. Ce résultat est fort logique sur le plan statistique, mais notons qu'il l'est également sur le plan comportemental ; en effet, il est tout à fait cohérent que les zones *poste téléphonique d'urgence* et *voiture* ressortent de l'analyse dans le cas des mouvements lents et non des fixations, dans la mesure où ces objets sont petits, ils excitent donc la curiosité, et se rapprochent au cours du temps. A contrario, il est logique de trouver la modalité (*paysage, ciel, panorama*) avec les fixations.

La cohérence des résultats trouvés concernant les deux modalités de très faibles effectifs étant mise en exergue, il est préférable de les supprimer de l'analyse dans la mesure où elles cachent d'autres phénomènes relationnels liés à des modalités probablement plus fréquentes.

##### IV.3.3.2.2 ACM en supprimant les zones téléphone d'urgence et voiture

Le tableau considéré croise les 72 tronçons et  $41-2=39$  modalités spatiales. Comme pour

l'analyse précédente, l'axe 1 est nettement plus important que les suivants (18% d'inertie relative par rapport à 13%, 11%, 10%, ...). La plupart des modalités ayant contribué au positionnement de l'axe 1 précédent, à savoir les modalités *petit* et *grand* des durées des clignements de paupières, se retrouvent ici comme modalités prépondérantes ; on trouve ensuite la modalité *grand* des amplitudes et durées des saccades, et enfin la modalité (*paysage, ciel, panorama*) de la variable zone pour les fixations.

Les positions respectives de ces modalités, figure IV.24a, traduisent en fait deux aspects temporels simultanés :

1) Aspect temporel de chronologie, dans la mesure où les tours s'organisent de manière plus ou moins cohérente le long de l'axe 1 (cf. la variable *tour* considérée en illustratif, figure IV.24a, et les projections des tronçons avec les couleurs correspondant aux tours, figure IV.24b). Globalement, les courbes d'évolution de la figure IV.25 confirment ceci, en notant toutefois une hiérarchisation dans l'apparence des phénomènes évolutifs : les courbes de la figure IV.25a montrent les phénomènes les plus marqués, ceux relatifs aux durées moyennes des clignements, variable dont les modalités *grand* et *petit* ont le plus contribué à positionner le premier axe ; les courbes de la figure IV.25c montrent les valeurs d'appartenance moyenne (VAM) à la zone (*paysage, ciel, panorama*), cette dernière modalité étant moins prépondérante que les deux précédentes. Pour les trois indicateurs de la figure IV.25, notons également que les dispersions intra-tour augmentent au fil des tours.

2) Aspect temporel de durée, dans la mesure où des saccades de grandes amplitudes durent plus longtemps que des saccades de faibles amplitudes, figure IV.26. Ceci est cohérent avec les résultats trouvés dans la littérature.

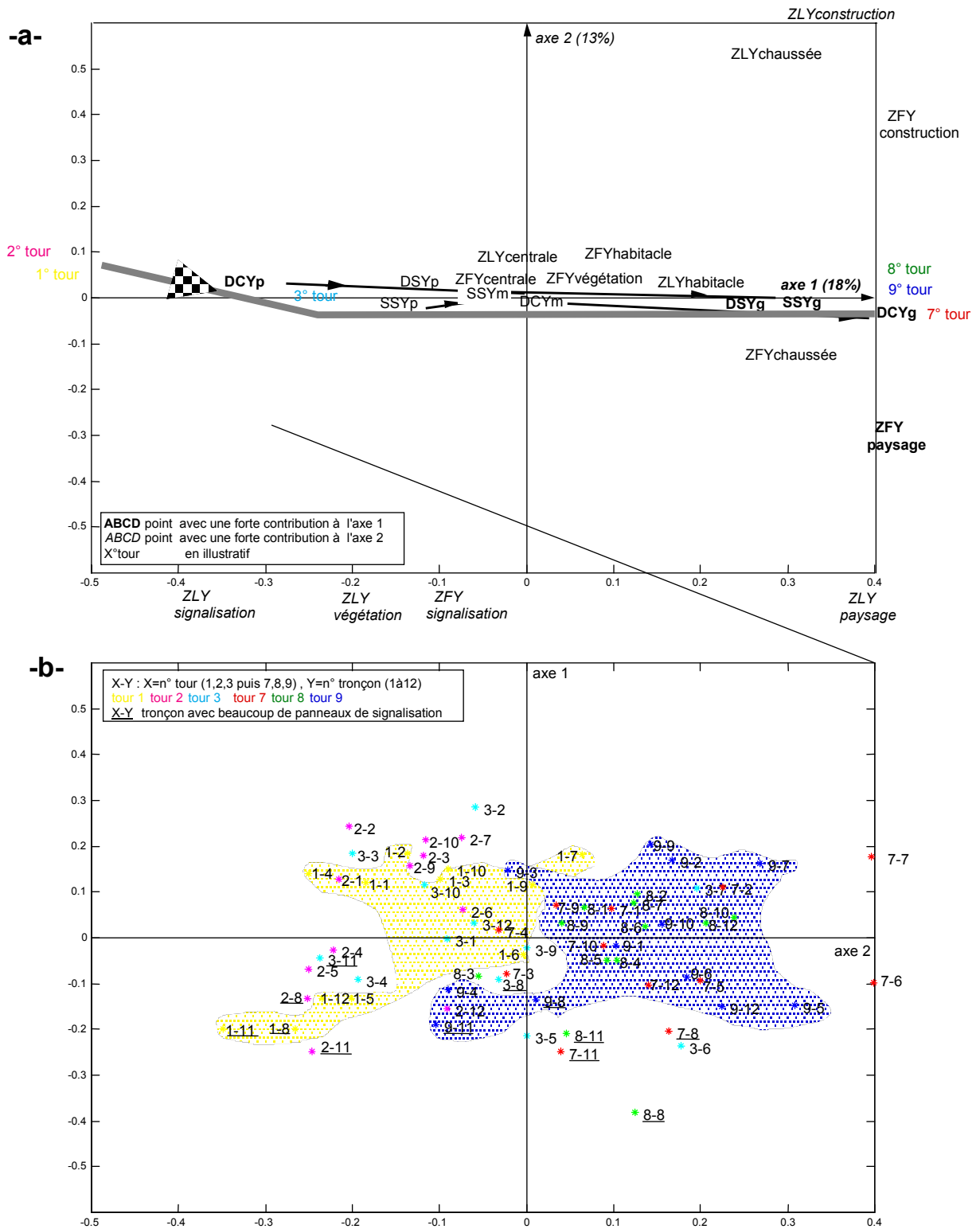


Figure IV.24 : Premier plan issu de l'ACM des variables relatives à l'activité oculaire ;  
 a) projection des points correspondant aux 39 fenêtres spatiales (uniquement les variables possédant les modalités avec les plus fortes contributions sont montrées) ;  
 b) projection des points correspondant aux 72 tronçons.

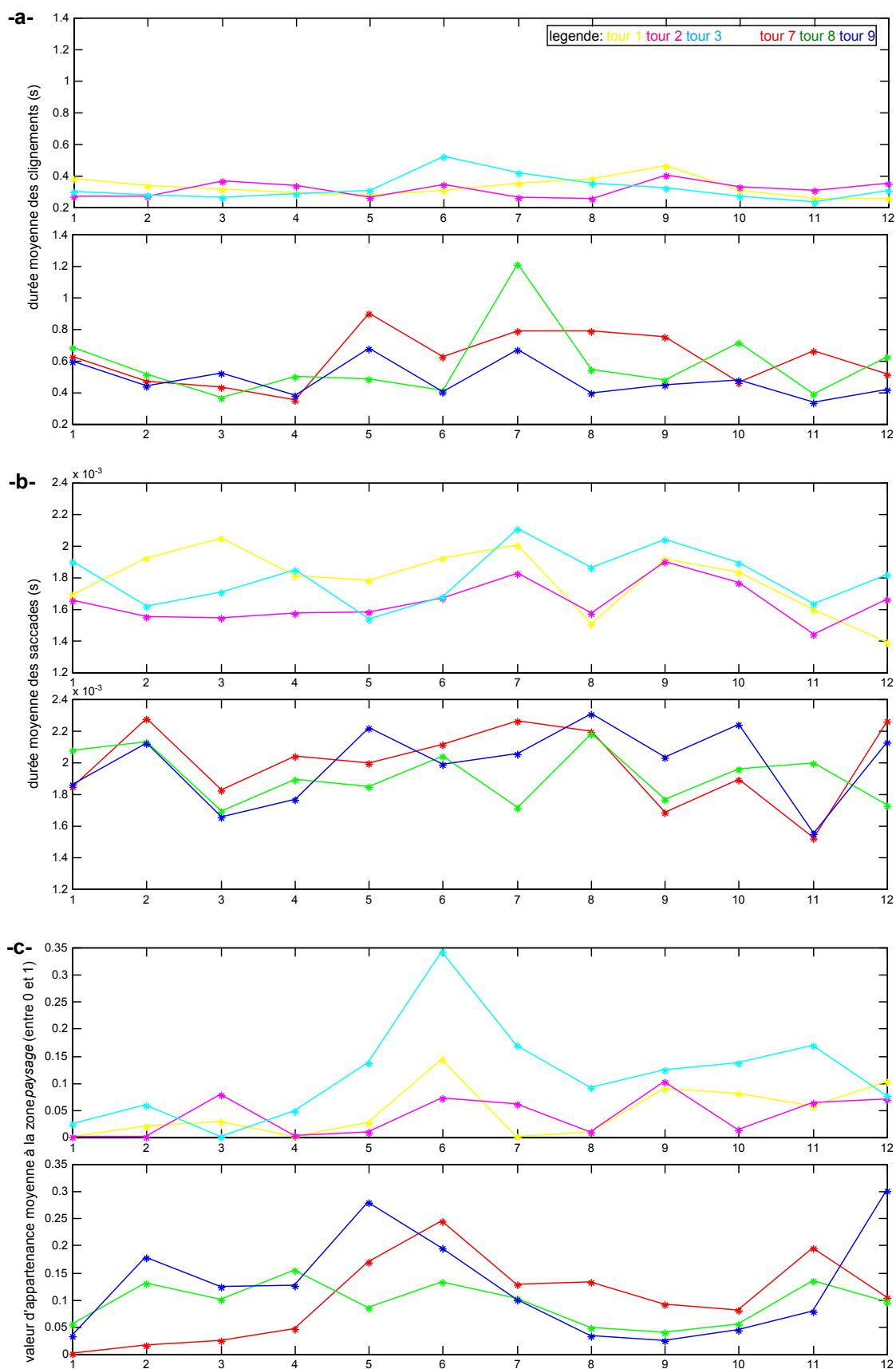


Figure IV.25 : Diagrammes d'évolution tour par tour ; a) durée moyenne des clignements ; b) durée moyenne des saccades ; c) valeur d'appartenance moyenne à la zone paysage.

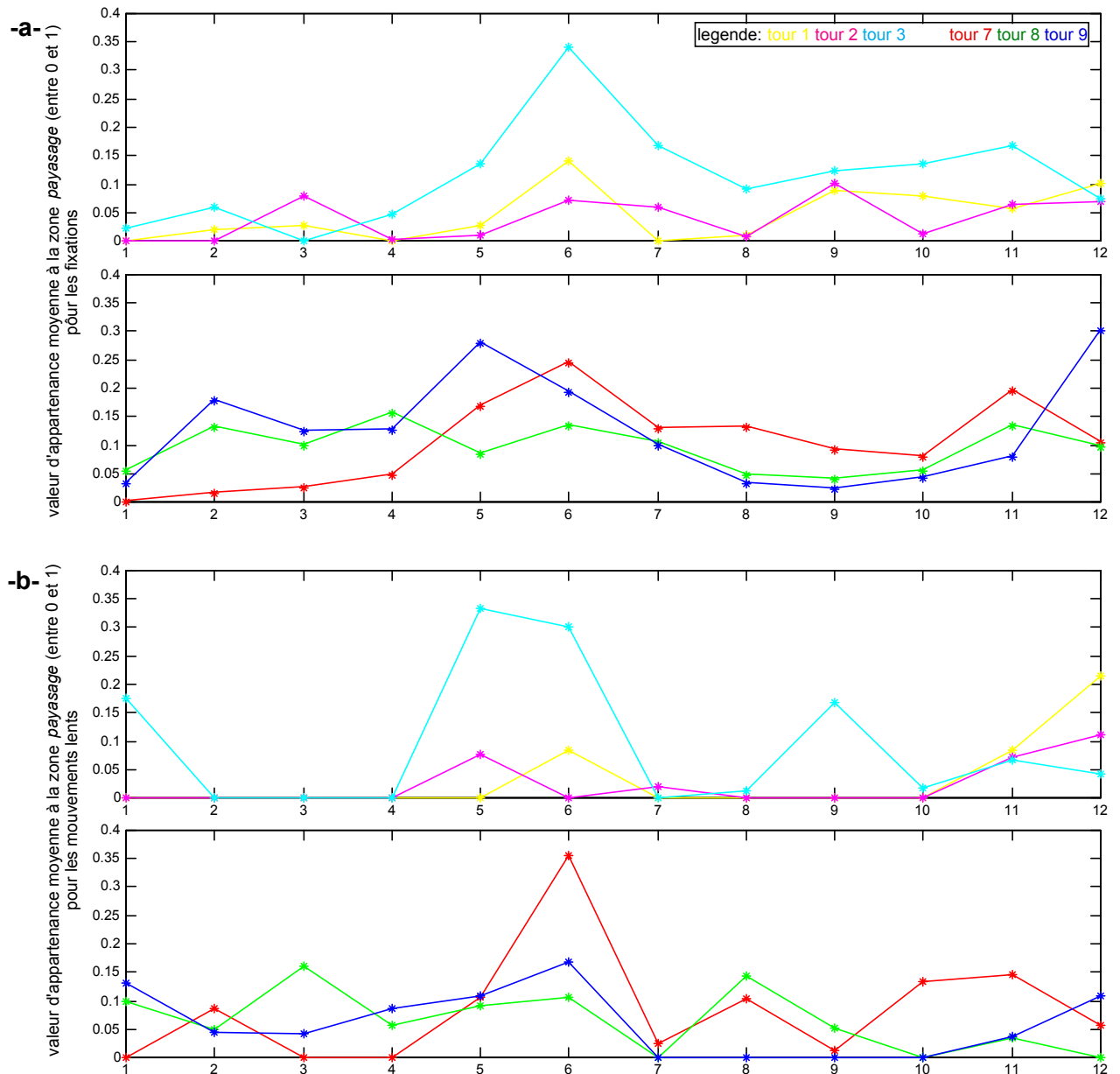


Figure IV.26 : Diagrammes d'évolution tour par tour de la valeur d'appartenance moyenne à la zone paysage ; a) cas des fixations ; b) cas des mouvements lents (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon).



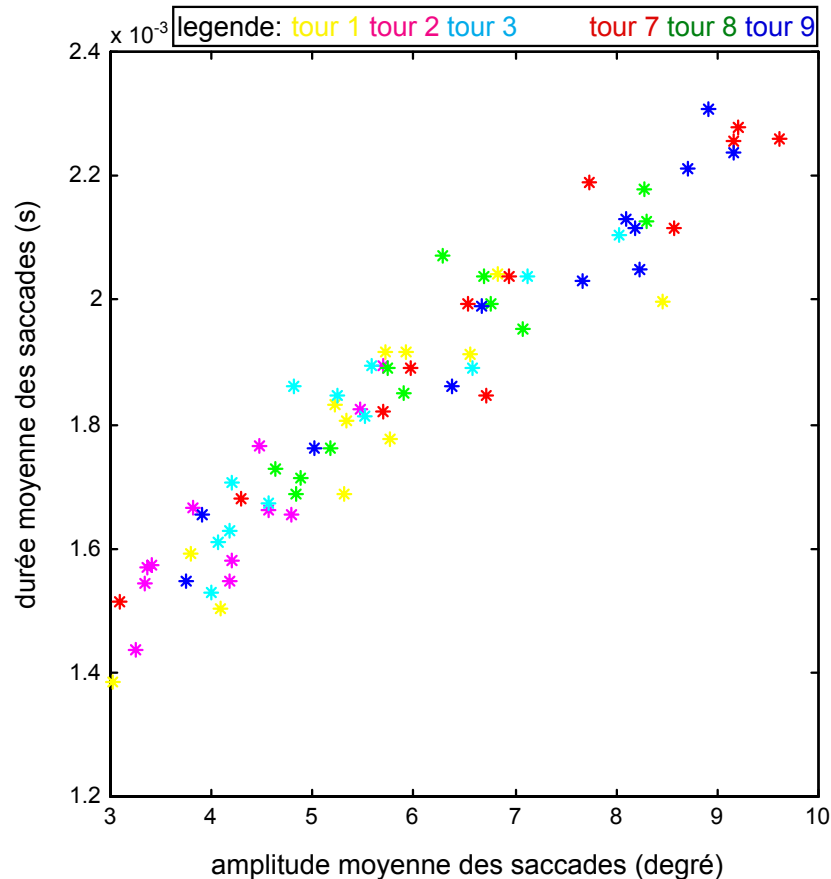


Figure IV.27 : Diagramme de dispersion entre la durée et l'amplitude des saccades (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon).

L'axe 2 est essentiellement positionné par des modalités indiquant des zones (variables ZLY et ZFY). Dans l'ordre décroissant des contributions relatives, on trouve les modalités *signalisation*, *paysage*, *végétation*, *construction* pour les mouvements lents et *signalisation* pour les fixations. Rappelons que, selon le principe barycentrique, une modalité est par construction d'autant plus proche du centre de gravité dans l'espace des modalités - espace de dimension 72 - qu'elle est fréquente. Si les axes 3, 4,... jouent des rôles non négligeables, notons toutefois que cet aspect de proximité est déjà bien respecté dans l'espace construit à partir des deux premiers axes. Notamment, la modalité *centrale* est très proche du point (0,0). A contrario, la modalité *signalisation* en est très éloignée. Remarquons également que, souvent, les modalités identiques pour les mouvements lents et les fixations sont relativement proches (cf. *signalisation*, *paysage*, ou *construction*).

Ces remarques étant faites, résumons l'axe 2 en disant qu'il fait ressortir les modalités *signalisation*, *végétation* et *paysage* (en bas de l'axe), qu'il oppose à la modalité *construction*. Insistons à nouveau sur l'absence des variables indiquant les durées (de fixations ou mouvements lents). Une explication sur la construction de cet axe 2 peut s'envisager en regardant de manière approfondie comment se positionnent les 72 tronçons et notamment en étudiant certains facteurs de variation de l'image, comme le nombre de panneaux de signalisation ou de constructions. En effet, les six tronçons n° 8 et les six tronçons n° 11 se retrouvent tous dans le bas du plan, figure IV.24b. Or il s'avère que ces tronçons sont ceux qui comportent le plus de panneaux de signalisation. Une vérification sur les enregistrements oculométriques confirme bien que le conducteur va effectivement les regarder, ce que traduisent les figures IV.28a., b et c. Une même observation peut être faite pour la partie supérieure de l'axe 2 qui se démarque par les constructions (tronçons n° 2 et

7), figures IV.29.a et b. A l'instar de l'axe 2 de l'ACM, ces différentes figures d'évolution montrent que le temps n'a pas d'influence marquée (influence monotone notamment).

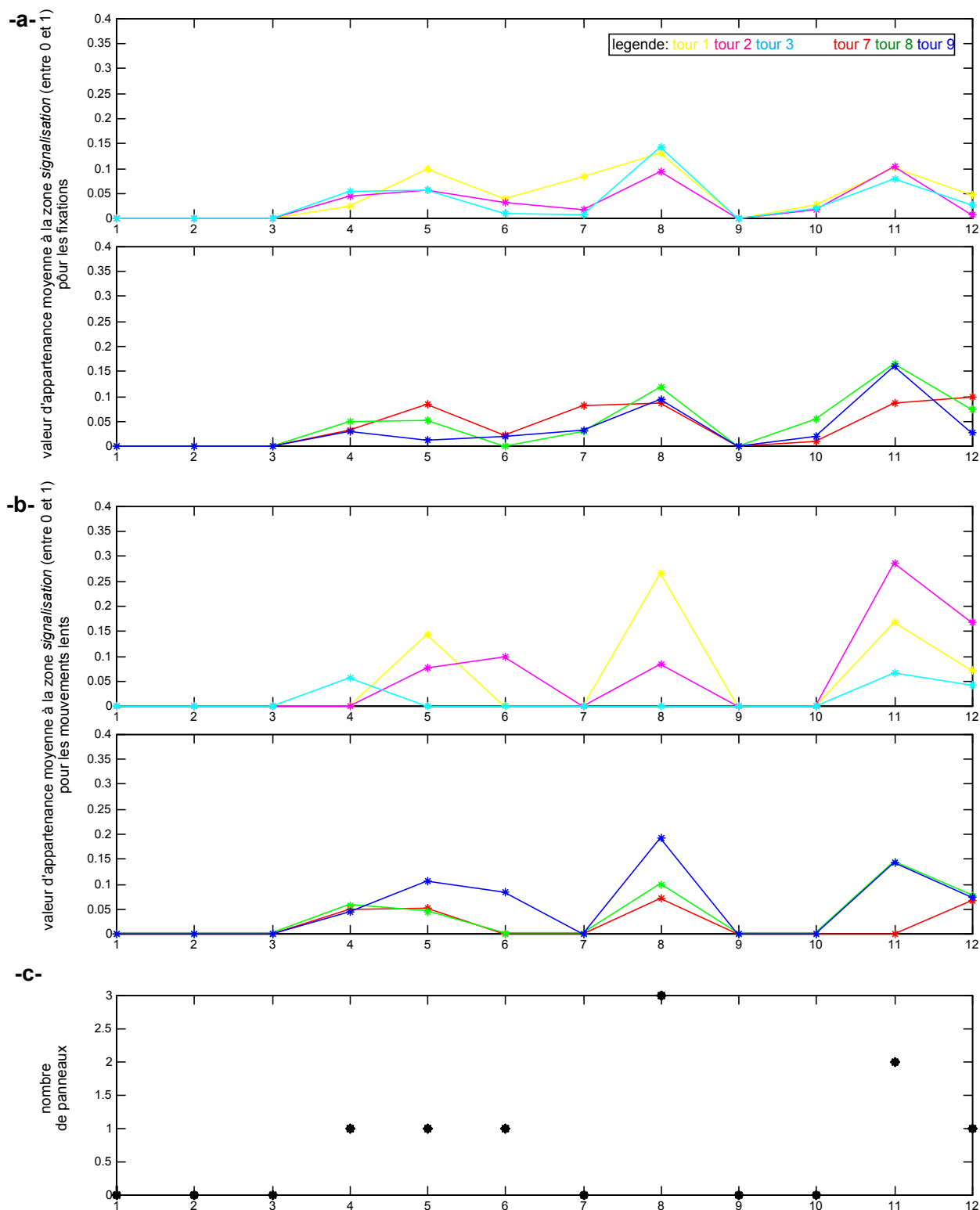


Figure IV.28 : Diagrammes d'évolution tour par tour de la valeur d'appartenance moyenne à la zone signalisation ; a) cas des fixations ; b) cas des mouvements lents (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon) ; c) nombre de panneaux de signalisation (pas de changement d'un tour à l'autre).

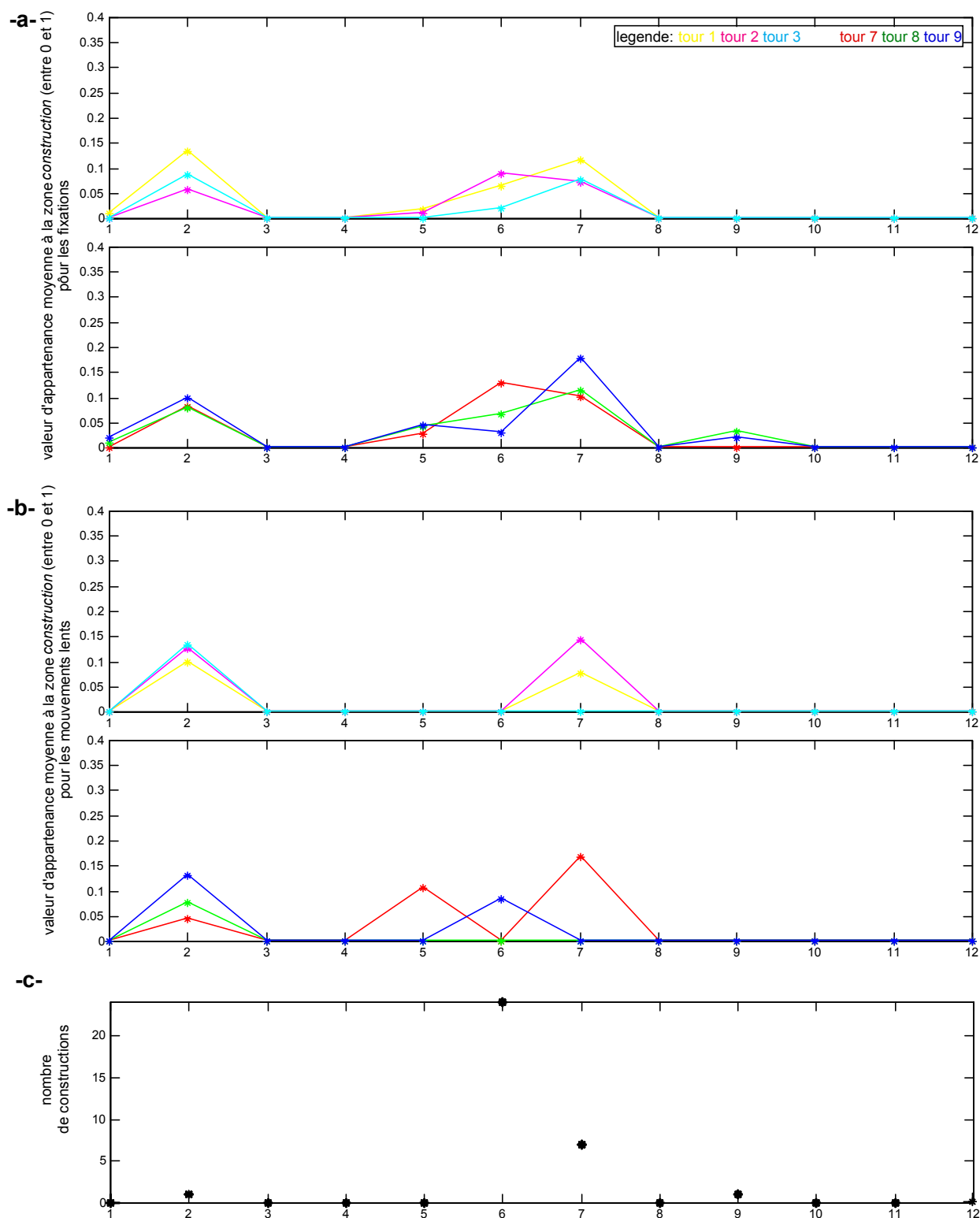


Figure IV.29 : Diagrammes d'évolution tour par tour de la valeur d'appartenance moyenne à la zone construction ; a) cas des fixations ; b) cas des mouvements lents (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon) ; c) nombre de constructions (pas de changement d'un tour à l'autre).

Pour la poursuite de l'analyse des résultats issus de l'ACM, on considère le fait que les axes 3 et 4 ont des inerties proches (respectivement 11% et 10%), conduisant donc à considérer le plan (3,4). Comme pour l'axe 2, les axes 3 et 4 sont essentiellement contrôlés par des modalités indiquant les zones. Concernant l'axe 3, les quatre premières modalités sont relatives aux mouvements lents avec, dans l'ordre décroissant des contributions relatives, les zones *paysage*, *signalisation*, *chaussée* et *habitable* ; pour l'axe 4, on trouve les zones *construction*, *chaussée* et *habitable* avec les mouvements lents puis à nouveau la zone *construction* avec les fixations. La figure IV.30.a montre les correspondances, positives et négatives, entre ces différentes modalités, correspondances qui peuvent s'expliquer de par la construction du circuit mais aussi par un comportement davantage spontané du conducteur. Considérons deux exemples :

Cas d'un fait imputable à la situation expérimentale :

- 1) la modalité *signalisation* contribue à positionner l'axe 3 (surtout de par les mouvements lents) et est située à gauche de l'axe 3 et , figure IV.30.a ;
- 2) certains des tronçons situés à gauche portent le n°8 ;
- 3) on peut vérifier qu'une des caractéristiques de ce tronçon est, entre autres, de contenir beaucoup de panneaux, cf. figure IV.28.c.

Cas d'une simple observation :

- 1) la modalité *habitable* contribue à positionner l'axe 4 (exclusivement de par les mouvements lents) et est située en bas de l'axe 4, figure IV.30.a ;
- 2) certains des tronçons parmi les plus en bas portent le n°7 et concernent les tours 1, 2 et 7 ; d'autres portent le n°2 et sont relatifs aux tours 1, 8 et 9 ;
- 3) on ne peut qu'observer que le conducteur effectue bien des mouvements lents sur les éléments de l'*habitable*, figure IV.31.b. (on peut également constater que les courbes de la figure IV.31.a sont en accord avec les résultats de l'ACM : il ne ressort aucun phénomène marquant des fixations dans l'*habitable* !).

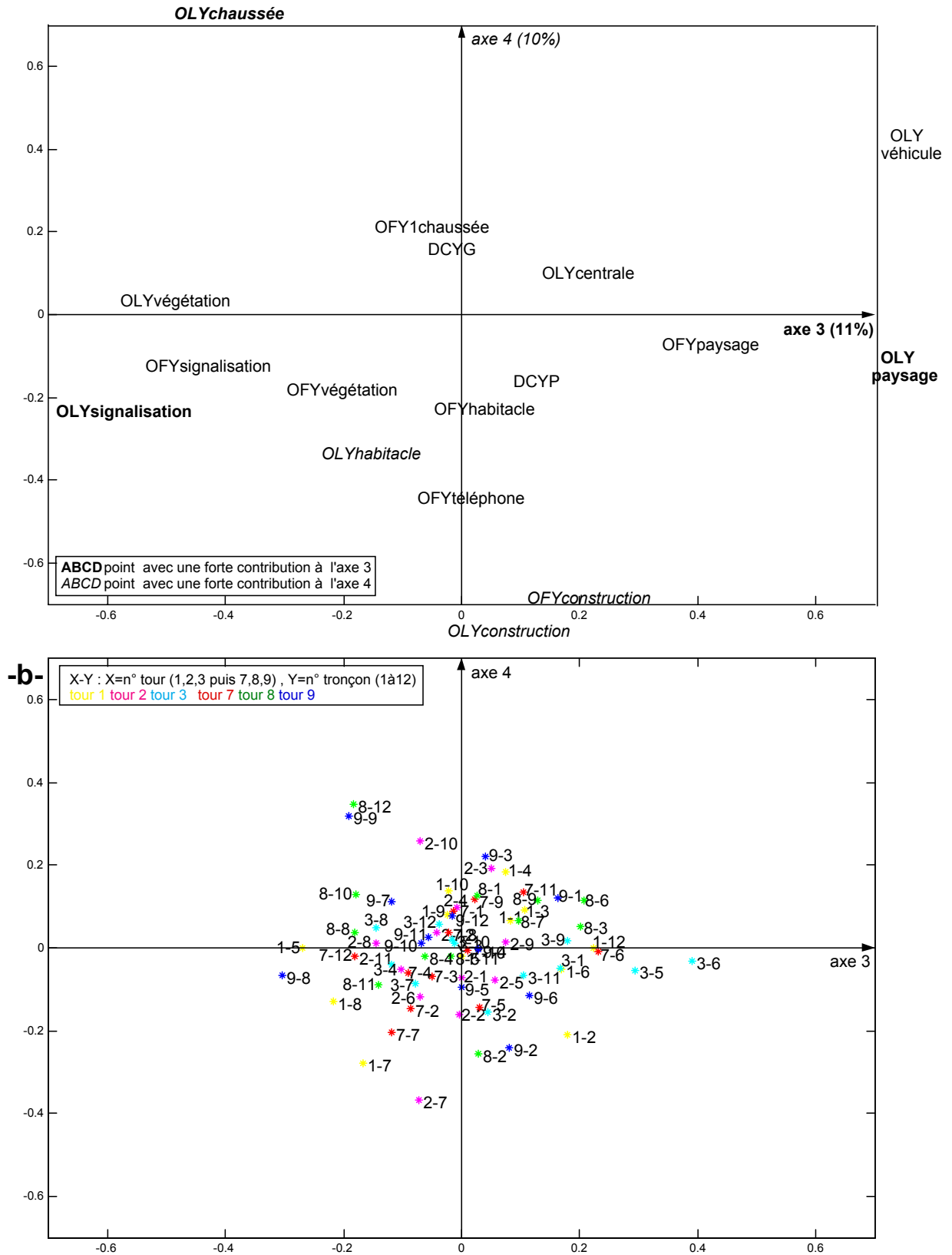
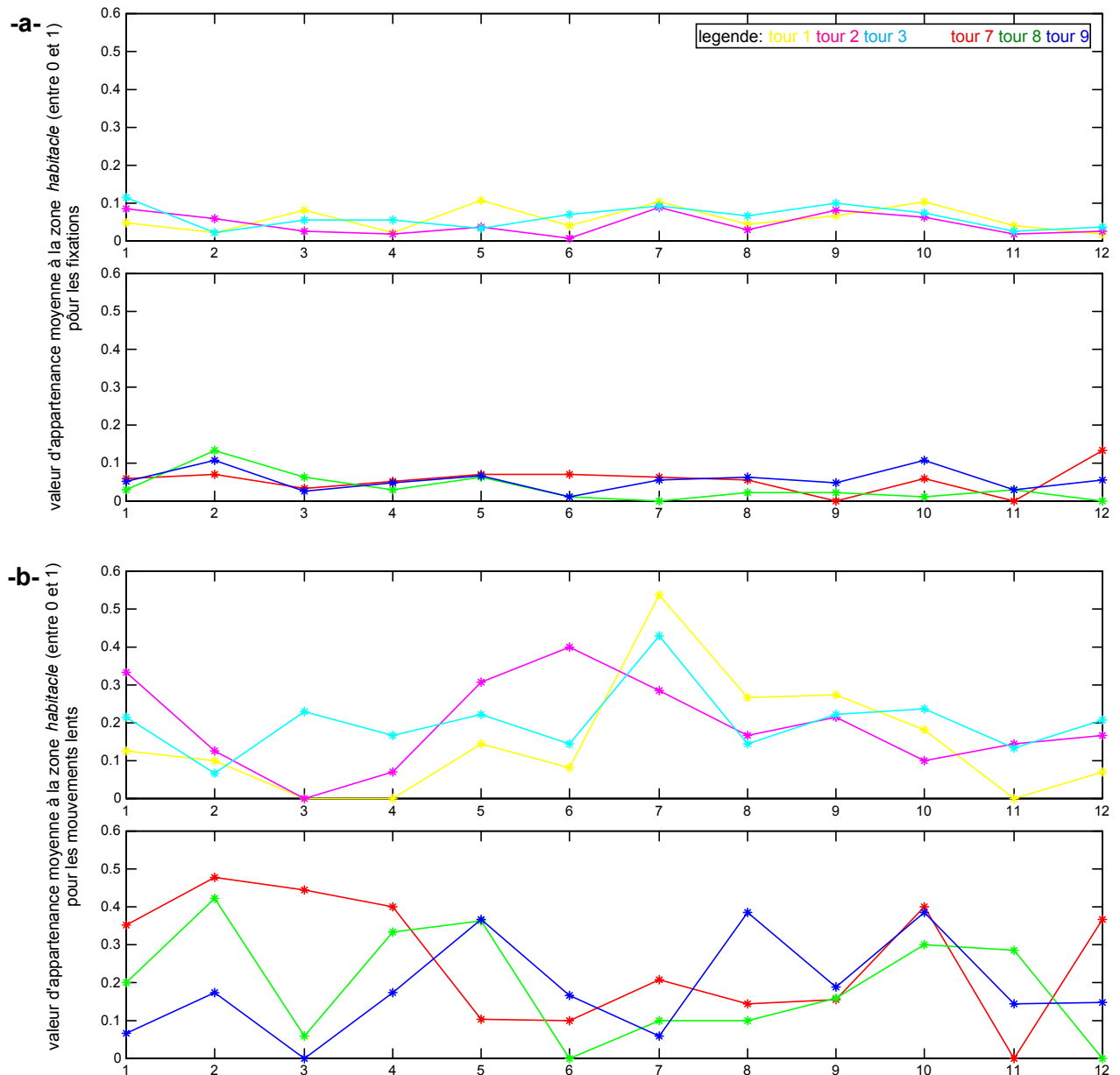


Figure IV.30 : Plan (3,4) issu de l'ACM des variables relatives à l'activité oculaire ;  
 a) projection des points correspondant aux 39 fenêtres spatiales (uniquement les variables possédant les modalités avec les plus fortes contributions sont montrées) ; b) projection des points correspondant aux 72 tronçons.



Le fait que l'ACM fasse ressortir une spécificité de l'élaboration du circuit — par exemple davantage de panneaux pour le tronçon n° 8 — peut être considéré comme un inconvénient de cette méthode, voire même un biais du protocole expérimental. Néanmoins, il n'en est rien car on montre bien que :

- 1) l'algorithme de traitement des signaux oculaires fonctionne correctement : 1a) on est en mesure d'isoler les fixations et les mouvements lents et 1b) d'indiquer quels sont les objets concernés par ces mouvements ;
- 2) l'ACM montre que ces panneaux sont effectivement visualisés, ceci après 2a) l'observation attentive des courbes d'évolutions et 2b) elles mêmes étant vérifiées par la relecture des

enregistrements oculométriques.

### **IV.3.3 Analyse conjointe des données de la voiture, de la tête et des yeux**

Les variables étant nombreuses, il est nécessaire de ne retenir de chacune des deux analyses précédentes qu'un sous-groupe de variables apparues comme prépondérantes **et** peu liées, ceci afin que les relations intra-groupes ne masquent pas les relations inter-groupes (rappelons alors que certaines variables sont apparues comme relativement bien liées au temps, d'autres non).

La recherche des deux sous-groupes respectifs s'appuie sur une approche exploratoire combinant une visualisation de diagrammes de dispersions et de plans factoriels. Cette recherche nous a conduit à retenir les variables suivantes :

- pour les données relatives à la tête, les mouvements de rotation autour de l'axe vertical Z, à savoir la position angulaire (mouvement de lacet, noté LT) et la valeur absolue de la dérivée (DLT),
- pour les données relatives à la voiture, aucune variable,
- pour les données relatives aux yeux, les durées des 4 entités oculaires et les valeurs d'appartenances moyennes (VAM) aux zones.

D'une manière générale, il ressort de cette analyse exploratoire en plusieurs étapes que les variables oculaires sont peu liées aux autres variables. A titre anecdotique, la figure IV.32 donne le premier plan factoriel issu de l'ACM des variables citées ci-dessus (8 variables). L'axe 1 est exclusivement positionné par les deux modalités extrêmes de la position angulaire de la tête (LT) ; l'axe 2 est essentiellement contrôlé par les deux modalités extrêmes de la durée des clignements (DCY) et, dans une moindre mesure, par la modalité intermédiaire de LT. Les résultats concernant l'influence du facteur temps sont en accord avec ceux trouvés dans les analyses séparées : au début des enregistrements oculométriques, les durées des clignements sont plus faibles qu'à la fin, avec un saut important entre la fin de période 1 et le début de la période 3, cf. axe 1 de la figure IV.24 ; quant à la position angulaire LT, elle est nettement influencée par le temps, cf. axe 2 de la figure IV.11

La figure IV.33a montre la correspondance traduite par l'axe 2 : lorsque la tête n'est pas tournée (LT=0), il semblerait y avoir davantage de courtes durées de clignements de paupières (rappelons que cette figure montre des valeurs moyennes des variables initiales alors que ce sont des VAM qui ont été considérées dans l'ACM, ces derniers indicateurs étant moins réducteurs que les premiers). La figure IV.33b montre une autre relation, cette fois-ci entre la durée des fixations et un indicateur traduisant l'activité gestuelle de la tête. A titre indicatif, précisons que le coefficient de corrélation vaut -0.52 et que c'est, de loin, la valeur absolue la plus élevée trouvée dans les différentes analyses exploratoires effectuées dans la mise en relation des deux groupes de variables. Si la relation traduite par le plan (1,2) de l'ACM et montrée figure IV.33a est difficilement explicable, la relation négative entre la durée des fixations et l'activité gestuelle de la tête est plus compréhensible. D'une part, l'influence du temps sur ces deux indicateurs a été mise en évidence. D'autre part, ces deux observations semblent indiquer un "niveau d'activité" plus important du conducteur au niveau de sa recherche d'informations visuelles.

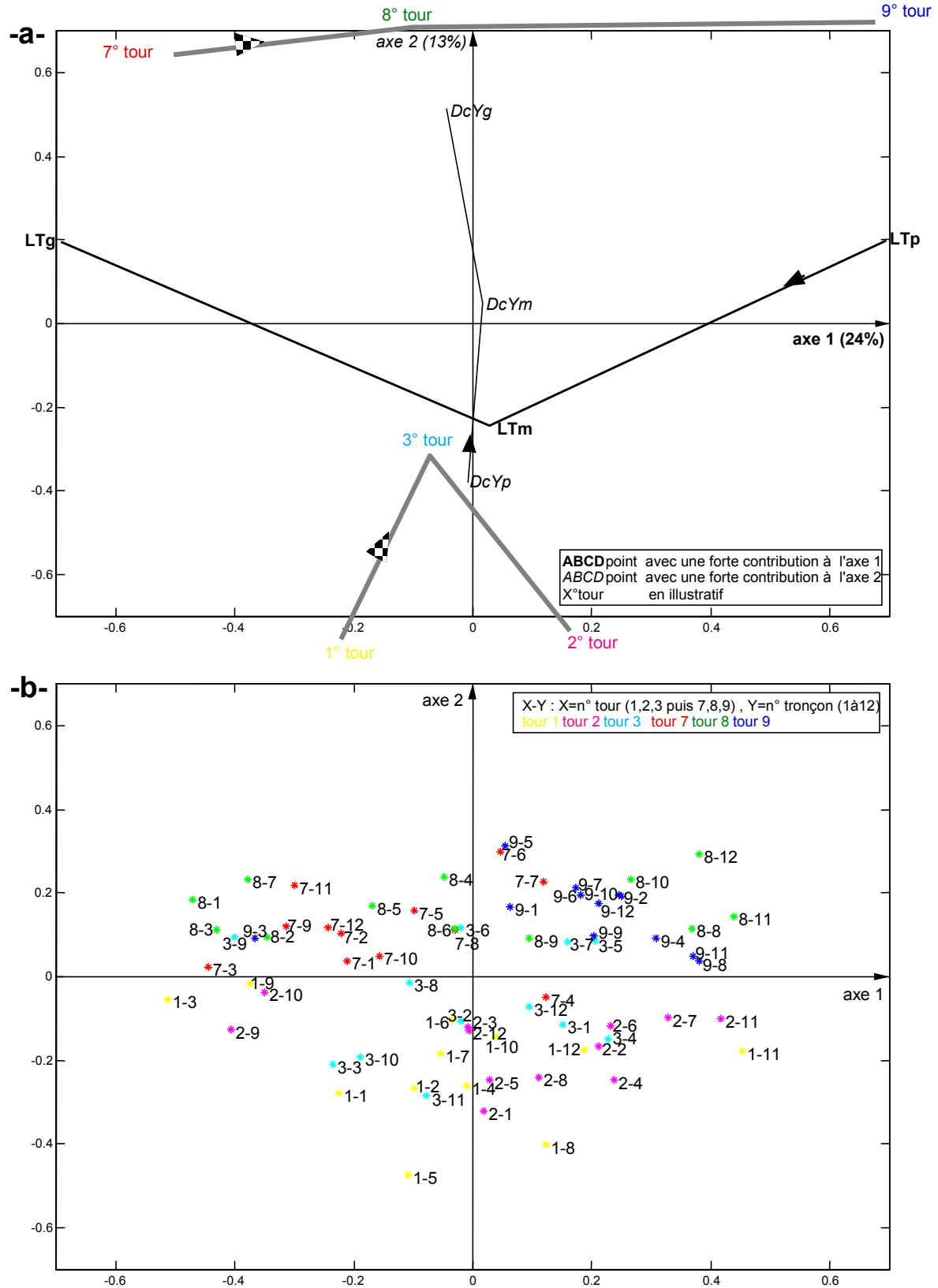


Figure IV.32 : Plan (1,2) issu de l'ACM des variables relatives aux yeux et à la tête ;  
 a) projection des points correspondant aux 39 fenêtres spatiales (uniquement les variables possédant les modalités avec les plus fortes contributions sont montrées) ; b) projection des points correspondant aux 72 tronçons.



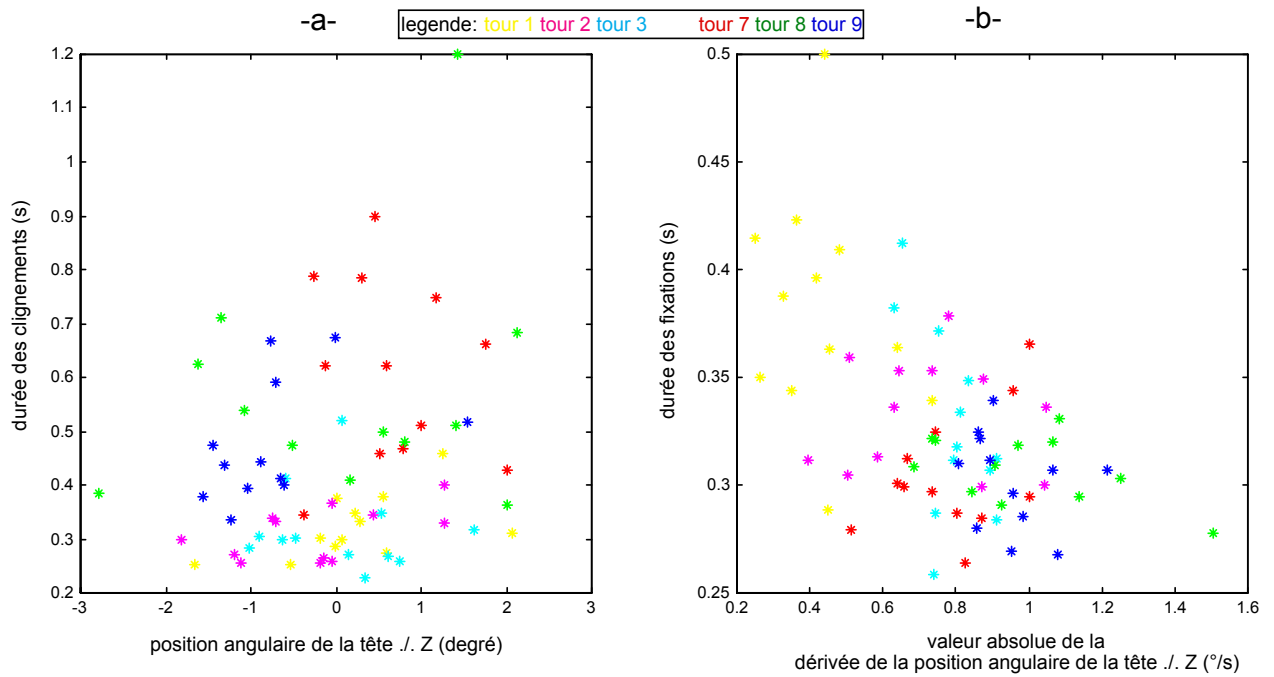


Figure IV.33 : Diagrammes de dispersion ; a) position angulaire de la tête par rapport à l'axe Z et durée des clignements ; b) valeur absolue de la dérivée des mouvements angulaires de la tête ./Z et durée des fixations (les valeurs considérées sont des moyennes calculées tronçon par tronçon).

#### IV.4 Synthèse des premiers résultats

Pour mémoire, les données effectivement analysées correspondent à un trajet de 288 kilomètres, soit une durée de conduite relativement longue (environ 3 heures) et donc "significative". Des contraintes techniques liées à la mesure des mouvements oculaires nous ont obligé à diviser ce trajet en quatre parties, l'oculomètre étant en service pendant les première et troisième parties. Chaque partie est elle-même composée de 3 "tours" comportant chacun 12 tronçons de 2 kilomètres chacun. L'analyse temporelle des résultats utilise ce découpage en parties, tours et tronçons.

Il convient de rappeler que les résultats fournis ci-après proviennent d'un seul et même conducteur. Ce premier sujet a permis de valider les nombreuses procédures de pré-traitements et traitements pour extraire l'information pertinente des données, nombreuses et hétérogènes, recueillies lors de l'expérience. Cette analyse statistique comporte essentiellement trois étapes :

- 1) l'analyse des données relatives à la voiture et aux mouvements de la tête ;
- 2) l'analyse des données oculaires ;
- 3) la mise en relation des deux groupes de données.

##### *IV.1.1 Analyses des données relatives à la voiture et aux mouvements de la tête*

Une première analyse réalisée sur l'ensemble des variables a mis en évidence une forte importance des évolutions des variables relatives aux positions de la tête par rapport à celles des variables décrivant la cinématique du véhicule. Sur ces variables "biomécaniques", l'analyse a montré que **le temps se manifeste clairement par un "tassement" du sujet dans le siège mais aussi par une augmentation de l'instabilité de la tête**, instabilité traduite par des indicateurs calculés sur la dérivée des signaux de base. Afin de donner quelques ordres de grandeurs de ces évolutions, indiquons que lors des 72 premiers kilomètres (première partie), la position verticale de la tête baisse d'environ 2 centimètres. La valeur absolue de la dérivée de cette position augmente pour sa part de 100%. Une seconde analyse réalisée sans ces variables "biomécaniques" a mis en évidence **une légère augmentation de la vitesse du véhicule au cours du trajet** (environ 2 km/h entre la première et la troisième partie). Il est important de préciser que ces différentes évolutions ne sont pas imputables au facteur type de tronçon, mais bien au facteur temps.

##### *IV.1.2 Analyse des données oculaires*

Cette seconde analyse montre que **le temps se manifeste très clairement par une augmentation de la durée des clignements de paupières** : 320 ms en moyenne pour la première partie du parcours contre 410 ms pour la troisième. Il s'agit là d'un effet " physiologique " bien connu, déjà mis en évidence par de nombreux travaux.

Une autre influence du temps, quoique moindre, concerne **l'amplitude des saccades qui tend elle aussi à augmenter au cours du temps** : 5,4 ° en moyenne pour la première partie contre 6,8 ° pour la troisième. **Simultanément, on observe une augmentation du taux de consultation du " paysage " : zones paysage, panorama, et ciel**. Une hypothèse, qui reste à vérifier et de toute façon émise pour ce sujet particulier, est qu'il s'agit là d'une dégradation de la prise d'information du conducteur, l'attention semblant se diriger sur des éléments a priori peu " informatifs " vis-à-vis de la tâche de conduite automobile.

### ***IV.1.3 Mise en relation des deux groupes de données***

La troisième analyse réalisée a visé à mettre en relation des groupes respectifs de variables dont les évolutions sont apparues comme prépondérantes et qui soient peu liées entre elles (faibles relations intra-groupes pour ne pas masquer les relations inter-groupes). Cette analyse a été menée sur des variables "biomécaniques" (cinématique de la tête) et des données relatives à la prise d'informations visuelles. Il ressort de cette dernière analyse que **des variables des deux analyses précédentes, apparues comme évoluant de manière significative avec le temps, sont peu liées entre elles**. Essentiellement une relation mérite d'être notée : la diminution de la durée des fixations avec l'augmentation de l'instabilité de la tête.

Le processus d'analyse doit maintenant être poursuivi tenant compte des données recueillies sur l'ensemble de la population expérimentale. Cette étape permettra de vérifier les choix des variables retenues dans les hypothèses (cf. chapitre I.3) et éventuellement de les amender. L'étape ultime consistera à tester la validité de ces hypothèses par une analyse confirmatoire.

## VI. POURSUITE DE L'ETUDE

### VI.1 Mise en œuvre de nouvelles approches d'analyse des données

Lors des expérimentations finales, 41 conducteurs se sont succédés dans SHERPA-Valenciennes pour réaliser un trajet autoroutier d'environ 350 kilomètres. La quantité de données recueillies s'avère très importante : 7 Go de données brutes & 240 heures d'enregistrements vidéo !

Un travail très important d'analyse et d'interprétation de ces données a d'ores et déjà été réalisé. Néanmoins, une telle base de données expérimentales mérite des investigations encore plus poussées.

Les analyses réalisées jusqu'à présent visent à détecter des symptômes d'hypovigilance ou de baisse d'attention, symptômes décrits au moyens de variables issues des différentes interactions caractérisant le système conducteur / véhicule / environnement et considérées simultanément. La suite du travail consiste à réaliser une étude temporelle de ces variables, c'est-à-dire envisager les symptômes d'hypovigilance ou de baisses d'attention sous la forme de successions de "dégradations" observées sur chacun des signaux de manière non forcément synchrone. Une telle analyse vise à améliorer le caractère prédictif des observations réalisées.

### VI.2 Extension du champ expérimental à la route réelle

Des progrès considérables ont été réalisés par rapport au début des travaux sur le plan de l'efficacité des moyens expérimentaux.

Les outils de génération de bases de données visuelles permettent désormais d'envisager de dupliquer avec un réalisme suffisant un trajet autoroutier réel. L'outil EVARISTE-réseau a été finalisé, les bibliothèques d'objets ont été enrichies et un véritable éditeur de panneaux sera prochainement disponible. Par ailleurs, PSA a depuis développé des compétences en matière de reproduction de trajet réel.

Un simulateur de conduite, aussi réaliste soit-il, est un outil dont l'efficacité dépend également des performances des outils de dépouillement associés. Le système SATMOS, développé par le LAMIH en collaboration avec PSA et permettant un traitement automatique des enregistrements oculométriques réalisés dans le simulateur SHERPA, apporte un gain de 20 sur les temps de dépouillement par rapport à un dépouillement manuel. Par contre, la première expérimentation réalisée par PSA sur route avec l'oculomètre ETS a souligné les limitations du logiciel de dépouillement fourni par le constructeur et les temps de dépouillement prohibitifs compte tenu des objectifs de l'étude. Une adaptation du système SATMOS à la conduite sur route est en cours et laisse espérer un gain de temps de l'ordre de 5.

Deux obstacles techniques majeurs à la réalisation d'expérimentations conjointes route/simulateur - reproduction d'un trajet autoroutier réel en simulateur et dépouillement des enregistrements oculométriques sur route - sont ainsi en passe d'être levés. Avec le soutien de la Fondation MAIF, PSA et le LAMIH disposent maintenant d'un outil expérimental original sur le plan international. Des expérimentations similaires à celles réalisées avec SHERPA-Valenciennes de mars à mai 1999 sont maintenant parfaitement envisageables sur route. De telles expérimentations doivent permettre d'aborder, de manière plus générale, le problème de la transposition de résultats issus d'études en simulateur à la conduite réelle.

### **VI.3 Nouvelles applications**

Les travaux réalisés ont permis de développer une batterie complète d'outils techniques et méthodologiques. Dans un premier temps, ces outils ont été utilisés afin d'étudier les problèmes d'hypovigilance et d'inattention lors d'un trajet autoroutier de longue durée. Les mêmes outils peuvent également servir à étudier la répercussion de l'introduction d'un système technique dans un véhicule (système d'aide à la navigation, radiotéléphone ) sur le comportement de conduite. Ces travaux s'inscrivent dans la problématique de la certification de nouveaux systèmes techniques introduits dans les véhicules et risquant d'interférer avec la tâche de conduite. L'objectif final est là encore la sécurité des conducteurs.

## CONCLUSION

Ce rapport final, rédigé dans le cadre de la convention de recherche liant la Fondation MAIF, la DRIA du groupe PSA Peugeot Citroën et le LAMIH de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, fait le point sur l' *Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic de l'état du conducteur*.

**D'un point de vue technique**, le projet a permis la mise en place de moyens expérimentaux "lourds" chez les deux partenaires :

- Le simulateur SHERPA développé par PSA a été dupliqué à l'Université de Valenciennes.
- PSA a fait l'acquisition d'un oculomètre ETS (capteur permettant de réaliser des mesures sur route en lumière de jour) et du logiciel de dépouillement associé.
- PSA a continué le développement de son système MAP et dispose désormais d'une mini-flotte équipée. Les deux simulateurs, SHERPA-Bièvres et SHERPA-Valenciennes sont également équipés.
- Le LAMIH a intégré son oculomètre portable ASL 4000 dans SHERPA et a développé un système automatisé de dépouillement des enregistrements (gain de 20 dans les durées de dépouillement).
- Le LAMIH a également développé des outils logiciels permettant une analyse globale de l'ensemble des données enregistrées lors d'une simulation.

Sur le plan des compétences, PSA dispose désormais du savoir-faire nécessaire à la mise en œuvre de l'oculomètre ETS et a également développé dans le cadre du projet des compétences en matière d'analyse du comportement du conducteur. Le LAMIH a conforté ses compétences en matière de mesure et d'analyse des stratégies visuelles du conducteur automobile, notamment en développant dans l'environnement SHERPA un système de mesure automatisé sans équivalent au niveau international.

**D'un point de vue scientifique**, ces moyens expérimentaux et ces compétences ont permis la réalisation de six campagnes expérimentales. Trois expérimentations ont été réalisées sur route par PSA (deux pour le développement du système MAP et une pour la mise en œuvre de l'oculomètre ETS), deux en simulateur par le LAMIH (pour la mise au point des techniques d'analyse des données simulateur ainsi que du système de traitement automatique des enregistrements oculométriques). Ces cinq expérimentations préliminaires ont débouché sur l'expérimentation finale du projet, réalisée conjointement par PSA et le LAMIH, mettant en jeu l'ensemble des "outils" : Méthode d'Apprentissage Progressif, analyse du comportement, Oculométrie, analyse des mouvements de tête du conducteur, et analyse des données simulateur (actions du conducteur, variables "mesurées" sur le véhicule).

Les travaux réalisés en simulateur ont permis de mettre en évidence des comportements de conduite significatifs de la baisse de vigilance et d'attention des conducteurs :

- une modification significative de la posture ;
- une dégradation du contrôle de la trajectoire ;

- une altération de la gestion de la vitesse du véhicule ;
- une modification de la prise d'informations visuelles du conducteur.

Ces différentes expérimentations ont permis aux deux partenaires de faire progresser leurs connaissances respectives. Le LAMIH a pu proposer un cadre méthodologique générique pour l'étude des comportements de conduite en mettant en évidence la nécessité d'étudier les interactions entre le conducteur, son véhicule et l'environnement au travers d'un ensemble de variables représentatives de ces interactions. Le LAMIH a également adapté et mis en œuvre une méthode d'analyse de l'ensemble des données recueillies basée sur une analyse exploratoire multidimensionnelle traitant les distributions codées par un découpage spatial en modalités floues. Le point fort de cette méthode est la prise en compte simultanée de données hétérogènes i.e. quantitatives (cinématique du véhicule, mouvements de tête du conducteur, ...) et qualitatives (observations éthologiques, stratégies visuelles, ...). De son côté, PSA a pu améliorer le système de diagnostic conducteur ainsi que l'interface d'alerte associée.

**Du point de vue de la production scientifique**, les travaux réalisés dans le cadre du projet ont débouché sur la rédaction de huit publications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture et de quatre rapports (deux rapports intermédiaires pour la Fondation MAIF et deux états d'avancement internes PSA/LAMIH). Ils ont également conduit à la soutenance de la thèse d'Alexis Todoskoff et à la soutenance de deux mémoires de DEA.

## BIBLIOGRAPHIE

- Cointot B., Siarry P., Boisvert E., Mevel Y., Bourhis S. & Faïdy J.P. (1993)  
*Detection of driver's low vigilance periods on motorway.*  
 Paper presented at the 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, 347-354, Aachen (Germany).
- Escofier B. & Pagès J. (1990)  
*Analyses factorielles simples et multiples.*  
 Editions Dunod, Paris.
- Fadier E. et al. (1994)  
*L'état de l'art dans le domaine de la fiabilité humaine.*  
 Editions Octares, Toulouse.
- Germain C. & Blanchet V. (1995)  
*La fatigue des routiers et ses conséquences en termes de sécurité.*  
 Revue "Recherche Transports Sécurité", 49, 63-72.
- Lebart L., Morineau A. & Fenelon J.P. (1982)  
*Traitement des données statistiques.*  
 Editions Dunod, Paris.
- Lechner D. (1994)  
*De l'expérimentation en vraie grandeur à la simulation (partie I).*  
 Actes INRETS n° 42, Simulation de la conduite automobile : validité dans une problématique de recherche, 48-59.
- Loslever P. (1996)  
*Modèles de caractérisation de données objectives et subjectives pour l'analyse des données multidimensionnelles.*  
 Habilitation à diriger les recherches soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis le 19 juin 1996.
- Neboit M. (1980)  
*L'exploration visuelle dans l'apprentissage de tâches complexes - L'exemple de la conduite automobile.*  
 Thèse de doctorat, Université René Descartes, Paris, Décembre.
- O'Hanlon J.F. & Kelly G.R. (1977)  
*Comparaison of performance and physiological changes between drivers who perform well and poorly during prolonged vehicular operation.*  
 In R.R. Mackie (Ed.), *Vigilance* (pp. 87-110). New York, Plenum Press.
- Peltier M-A. (1993)  
*Un système adaptatif de diagnostic d'évolution basé sur la reconnaissance des formes floue - application au diagnostic du comportement d'un conducteur automobile.*  
 Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne.
- Pierre J. & Quilici J.F. (1980)  
*Véhicules routiers.*  
 Document de Cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées.
- Planque S., Chaput D., Petit C., Tarrière C. & Chabanon C. (1991)  
*Analysis of EOG and EEG signals to detect lapses of alertness in car driving simulation.*  
 In proceedings of the 13th international conference on experimental safety vehicles, Paris.



- Tarrière C., Chaput D., Poilvert C. & Tamalet D. (1988)  
*Driver vigilance state control : a key aspect of the driver-vehicle-environment interface.*  
In Proceedings FISITA'88, 865-874.
- Yamamoto K., Ichikawa T., Hirata Y. & Higuchi S. (1995)  
*Correlation between vehicle's meandering and driver's alertness level.*  
Journal of JSAE, 16, 49-54.

## PRODUCTION SCIENTIFIQUE LIÉE A L'ETUDE

### • Publications dans des congrès et des revues :

Dillies-Peltier M-A. (1998)

*Détection de changements d'état du conducteur par analyse de son activité de conduite.*  
Actes des 4èmes journées Modul'ad, Guyancourt, 17-18 novembre.

Loslever P., Todoskoff A., Popieul J-C. & Simon P. (1998c)

*Les chemins de l'analyse statistique de données temporelles - Exemple de l'analyse du système Conducteur-Véhicule.*

Document interne LAMIH, Université de Valenciennes, Octobre. Article accepté et à paraître dans la revue JESA (Journal Européen des Systèmes Automatisés).

Simon P., Todoskoff A., Popieul J-C. & Angué J-C. (1996)

*Toward an automatic processing of a car driver eye movements on a real highway driving context.*  
Paper presented at the CESA'96 IMACS/IEEE Multiconference, Lille (France), July.

Simon P., Todoskoff A., Popieul J-C. & Angué J-C. (1997)

*Towards a quantitative study of a car driver's eye movements : Description of a filtering algorithm.*  
Paper presented at the 30th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence (Italy), June.

Simon P., Popieul J-C., Voillequin T. & Angué J-C. (1999)

*Description d'un système automatisé de recueil de l'exploration visuelle du conducteur automobile en simulateur.*

Communication présentée à la conférence DSC'99 (Driving Simulation Conference), Paris (France), juillet.

Todoskoff A., Popieul J-C., Simon P. & Angué J-C. (1997a)

*Evaluation Method of driver's behavior on motorway.*

In Proceedings of the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation System (pp. 1363-1368).  
Chania (Greece), June.

Todoskoff A., Popieul J-C., Simon P. & Angué J-C. (1997b)

*Analysis of car driving behavior.*

Paper presented at the 7th international conference Vision In Vehicles, Marseille (France), September.

Todoskoff A., Loslever P., Popieul J-C. & Simon P. (1998a)

*L'analyse du comportement du conducteur automobile. Partie I : synthèse bibliographique sur les facteurs, variables et méthodes de mise en relations.*

Document interne LAMIH, Université de Valenciennes, Juin. Article soumis en juin 1998 à la revue "Le Travail Humain".

Todoskoff A., Popieul J-C., Loslever P. & Simon P. (1998b)

*Study of temporal evolutions of driver's behavior on motorway : multidimensional analysis of data related to vehicle kinetics and driver posture.*

Paper presented at the 7th international conference EAM, Valenciennes (France), december.

Todoskoff A., Dillies M-A., Popieul J-C. & Angué J-C. (1999b)

*Characterization of driver's behavior : a joint study in a car driving simulator and in real driving situations.*

Communication présentée à la conférence DSC'99 (Driving Simulation Conference), Paris (France), juillet.

• **Rapports :**

Burlion E. (1999)

*Recueil et analyse de l'activité oculaire du conducteur automobile en simulateur - Application à l'estimation de la vigilance.*

Rapport de DEA en Automatique des Systèmes Industriels et Humains, promotion 98-99.

Capart J. (1998)

*Recueil et analyse de l'activité oculaire du conducteur automobile en simulateur - Comparaison route départementale / autoroute.*

Rapport de DEA en Automatique des Systèmes Industriels et Humains, promotion 97-98.

Dillies M-A., Jan C., Koch C., Nathan F., Loslever P., Popieul J-C., Simon P. & Todoskoff A. (1999)  
*Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic de l'état du conducteur.*

Convention de recherche Fondation MAIF / PSA / LAMIH, 2nd rapport intermédiaire, mai.

Popieul J-C., Simon P., Todoskoff A. & Angué J-C. (1996)

*Compte-rendu des tests préliminaires réalisés à Bièvres dans le mini-simulateur PSA.*

Rapport intermédiaire, contrat avec PSA Peugeot Citroën - Direction des Recherches et Affaires Scientifiques, juillet.

Simon P., Popieul J-C., Todoskoff A. & Angué J-C. (1996)

*Enregistrement de l'activité oculaire de conducteurs automobiles sur autoroute en vue de la spécification de nouveaux outils de dépouillement.*

Rapport intermédiaire, contrat avec PSA Peugeot Citroën - Direction des Recherches et Affaires Scientifiques, février.

Todoskoff A., Dillies M-A., Popieul J-C., Simon P. & Loslever P. (1997)

*Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic de l'état du conducteur.*

Convention de recherche Fondation MAIF / PSA / LAMIH, 1er rapport intermédiaire, novembre.

• **Thèse :**

Todoskoff A. (1999a)

*Etude des évolutions temporelles du comportement du conducteur sur autoroute : Analyse multidimensionnelle de signaux relatifs au véhicule et aux mouvements de tête du conducteur.*

Thèse de Doctorat spécialité Automatique Industrielle et Humaine, soutenue le 20 janvier 1999 à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.