

MICHELE MOESSINGER

MOHAMED KASSAAGI



RENE AMALBERTI

FRANCK MARS

LOT 3

Décision d'aide :
N°03K208 (GIE)
N°03K209 (IRCCYN)

**Méthodologie d'évaluation de l'adaptation comportementale
induite par les assistances à la conduite**

(MEDAC)

Responsable Scientifique :

René AMALBERTI

Institut de Recherche en communication et cybernétique de Nantes

IRCCyN

1 rue de la Noë – BP 92101

44321 Nantes Cedex 3

Avec la participation de :

LAB

- Jean Marc Bersac – Ingénieur - CEESAR
- Lionel Boulommier – Ingénieur - CEESAR
- Jean-François Lydie – technicien – CEESAR
- Annie Picot – LAB
- Françoise Back - Medecin
- Clément Val – Ingénieur - GIST

CEPA

- André DUFOUR – Professeur

IRCCyN

- Jean-Michel HOC - Professeur

LIVIC

- Jean-Marc Blosseville – Directeur du LIVIC

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| RESUME..... | 9 |
| INTRODUCTION..... | 11 |
| ETAT DE L'ART | 13 |
| 1. LE PHENOMENE DE COMPENSATION DU DANGER | 13 |
| 2. LES MODELES DE COMPENSATION DU DANGER | 15 |
| 3. ORIGINALITE DE L'ETUDE..... | 17 |
| 4. ROLE DES FONCTIONS PERCEPTIVES EN CONDUITE AUTOMOBILE..... | 18 |
| 5. HYPOTHESES | 19 |
| MATERIEL ET METHODE | 23 |
| 1. SUJETS..... | 23 |
| 1.1. <i>Enjeux accidentologiques</i> | 23 |
| 1.2. <i>Choix expérimentaux</i> | 24 |
| 2. LES ALERTES | 24 |
| 2.1. <i>Solutions techniques</i> | 24 |
| 2.2. <i>Critère de déclenchement</i> | 26 |
| 2.3. <i>Réalisation technique</i> | 27 |
| 3. INSTRUMENTATION DES VEHICULES | 28 |
| 4. MESURES..... | 30 |
| 5. PROTOCOL EXPERIMENTAL..... | 31 |
| 5.1. <i>Phase de recrutement</i> | 31 |
| 5.2. <i>Phase expérimentale</i> | 31 |
| 5.3. <i>Hypothèses</i> | 33 |
| 6. DONNEES RECUEILLIES..... | 34 |
| 7. PARAMETRES EXTRAITS | 36 |
| 7.1. <i>Paramètres macroscopiques (par tour)</i> | 36 |
| 7.2. <i>Paramètres microscopiques (par virage)</i> | 37 |
| 8. METHODOLOGIE DE TRAITEMENT STATISTIQUE..... | 38 |
| RESULTATS | 41 |
| 1. RESULTATS MACROSCOPIQUES | 41 |
| 1.1. <i>Vitesse moyenne par tour</i> | 41 |
| 1.1.1. Test de l'hypothèse 1 | 41 |
| 1.1.2. Test de l'hypothèse 2..... | 41 |
| 1.1.3. Test de l'hypothèse 3..... | 42 |
| 1.2. <i>Vitesse moyenne en lignes droites et Vitesse moyenne en virages</i> | 45 |
| 1.2.1. Statistiques descriptives..... | 45 |
| 1.2.2. Test de l'hypothèse 1 | 46 |
| 1.2.3. Test de l'hypothèse 2..... | 47 |
| 1.2.4. Test de l'hypothèse 3..... | 48 |
| 1.3. <i>Analyses complémentaires</i> | 49 |
| 1.3.1. Effet Expérimentateur | 49 |
| 1.3.2. Fréquence de Déclenchement de l'Alerte | 49 |
| 1.4. <i>Conclusions de l'analyse macroscopique</i> | 51 |
| 2. RESULTATS MICROSCOPIQUES | 53 |
| 2.1. <i>Traitement statistique des indices pour les virages</i> | 53 |
| 2.1.1. Vitesse au point de corde..... | 53 |
| 2.1.2. Accélération Transversale Maximale | 59 |
| 2.1.3. Rayon de courbure..... | 60 |
| 2.1.4. Conclusions sur les indices dans les virages..... | 61 |
| 2.2. <i>Traitement statistique des indices pour les lignes droites</i> | 62 |
| 2.2.1. Vitesse maximale | 62 |
| 2.2.2. Accélération maximale..... | 65 |
| 2.2.3. Accélération minimale (ou décélération maximale) | 65 |
| 2.2.4. Conclusions sur les indices dans les lignes droites..... | 66 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3. Discussion Générale | 66 |
| 2.3.1. Véhicule Récent vs. Véhicule Récent avec Système d'Alerte..... | 66 |
| 2.3.2. Modification de la conduite entre la phase de test et la phase de consolidation..... | 67 |
| 2.3.3. Profil de conduite..... | 67 |
| 2.3.4. Impact du système d'alerte | 67 |
| 3. RESULTATS SUBJECTIFS | 68 |
| 3.1. Analyse du Questionnaire à l'issue de la conduite en Phase de test | 68 |
| 3.1.1. Sensations générales | 68 |
| 3.1.2. Performance de conduite en phase de test..... | 69 |
| 3.1.3. Perception du système d'alerte..... | 71 |
| 3.2. Analyse du Questionnaire à l'issue de la conduite en Phase de consolidation | 72 |
| 3.3. Conclusion | 73 |
| CONCLUSION | 74 |
| BIBLIOGRAPHIE | 76 |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS | 79 |
| TABLE DE REFERENCES | 82 |
| ANNEXES | 84 |

RESUME

Objectifs :

La sollicitation à un niveau préconscient des canaux proprioceptifs et kinesthésiques des conducteurs permet-elle d'obtenir naturellement une modification comportementale ?

Deux systèmes d'alertes « naturelles » ont été conçus et expérimentés :

- une Sur-assistance de la direction (sensation de "flou" au volant par la diminution « brutale » et brève du couple) ;
- un Siège à coussins pneumatiques (dégradation légère du confort par dégonflage des coussins d'appui).

Le déclenchement simultané de ces 2 alertes est paramétré selon un seuil d'accélération transversale. Le conducteur reçoit des informations proprioceptives correspondant à une accélération latérale moins élevée, signe du dépassement du potentiel transversal du véhicule.

Méthode :

55 sujets hommes de 27 à 52 ans ont conduit l'un des 3 véhicules suivants : véhicule "ancien" (Mégane I), véhicule "récent" (Mégane II), véhicule "récent équipé d'une alerte naturelle" (Mégane II). Les sujets ont participé à 3 phases de conduite : familiarisation, test et consolidation.

INTRODUCTION

Dans cette étude, nous cherchons à solliciter, à un niveau pré-conscient les canaux proprioceptifs et kinesthésiques des conducteurs pour obtenir « naturellement » une modification comportementale.

L'idée de départ repose sur les théories de la modélisation du risque dont le postulat est que la régulation des risques est un phénomène conscient et volontaire. Cette régulation appelée adaptation comportementale se manifesterait par une augmentation de la prise de risque individuelle lorsque l'on met le conducteur dans des situations environnementales plus sûres (véhicules modernes, infrastructures routières performantes...). Le champ des recherches sur les alertes naturelles quant à lui, postule que 80% du traitement de la tâche de conduite est automatisé et du domaine des routines.

Partant du constat que les sorties de voie involontaires et de leur enjeu en accidentologie (plus de 40% des accidents impliquant au moins un véhicule léger et 70% des tués), ce projet est focalisé sur le contrôle transversal ou négociation de virage.

ETAT DE L'ART

Certains experts préfèrent à l'expression de *compensation du danger* l'expression plus générale « *d'adaptation comportementale* » (OCDE, 1990). Ces deux expressions désignent le fait que certains systèmes de sécurité a priori efficaces pour éviter des accidents sur la route ou pour en atténuer la gravité se révèlent, une fois introduits, avoir un effet inférieur ou contraire en termes de sécurité à l'effet attendu. Donnons quelques exemples de ce phénomène et les interprétations qui en sont faites.

1. LE PHENOMENE DE COMPENSATION DU DANGER

Herms (1972) observe un effet très défavorable de l'introduction des passages piétons sur la sécurité de ces derniers. Les marquages au sol amènent les piétons à juger la traversée de la chaussée plus sûre mais ne rendent pas moins dangereux les conducteurs. Entrée dans les mœurs, ces dispositifs conservent toutefois leur part d'effets pervers en amenant les conducteurs à faire moins attention à l'émergence inopinée de piétons, mais cette fois sur les zones non-marquées.

Asogwa (1980) observe une augmentation du nombre de morts (de 171%) et de blessés (de 55%) chez les motocyclistes nigériens après l'introduction d'une loi les obligeant à porter un casque. Cette augmentation apparaît en dépit (ou à cause) d'un taux de port du casque important (96%), en tenant compte de l'augmentation du nombre d'utilisateurs de la moto dans le pays et vaut sur la période de 2 ans qui suit l'introduction de la loi. Contradictoire avec ce qui a pu être observé dans d'autres pays à la même période (voir, Chenier et Evans, 1985), elle est imputée par certains auteurs à une surestimation du caractère protecteur du casque et, en conséquence, à un accroissement de la prise de risque chez les porteurs du casque (Evans, 1985).

C'est également l'argument qu'avait déjà invoqué Peltzman (1975) pour expliquer le fait qu'un grand nombre de mesures visant à améliorer la sécurité dans les voitures dans les années 60 se sont révélées au global inefficaces.

Les compétences réelles du conducteur pourraient également jouer un rôle défavorable sur la régulation de la prise de risque. Williams et O'Neill (1974) observent que les participants réguliers à des courses automobiles sont plus souvent impliqués dans des accidents et commettent plus souvent des infractions. Carsten (1981) et Williams (1985) montrent que les conducteurs qui ont de meilleures capacités visuelles, des temps de réaction plus courts et ont moins tendance à l'endormissement au volant ont pourtant un taux d'implication dans des accidents bien supérieur aux autres. Enfin, Ray (1983) montre que les conducteurs qui ont suivi une formation complémentaire à la conduite sont eux aussi plus exposés aux risques d'accidents. Autrement dit, il est possible que l'amélioration des compétences et des capacités à la conduite puisse avoir un effet négatif en termes de sécurité.

D'autres arguments que celui de la régulation de la prise de risque ont été invoqués pour expliquer le phénomène d'adaptation comportementale. Ce constat doit nous alerter sur la grande variété possible des mécanismes psychologiques ou comportementaux en jeu.

Evans (1985) considère que la relative inefficacité des législations visant à imposer le port de la ceinture (Evans et Wasielewski, 1982 ; Adams, 1982 ; Hearne, 1981; Evans et Graham, 1991) pourrait être due à un biais de sélection. Les personnes qui porteront leur ceinture de sécurité sont également celles qui ont le plus d'aversion au risque (Evans et al., 1982),

commettent moins de violations en général et ont moins d'accidents (Evans et Wasielewski, 1983). Ainsi, ils seront mieux protégés mais auront également moins souvent besoin de cette protection. A l'inverse ceux qui ne porteront pas la ceinture s'exposeront toujours dans les mêmes proportions à l'accident. Ce type d'étude n'illustre pas le phénomène de compensation du danger, mais montre que certaines mesures de prévention sont inefficaces pour certains individus réfractaires.

Pour expliquer les effets désastreux d'un système de feu vert clignotant précédant l'apparition du feu orange, Hakkert et Mahalel (1978) ont invoqué un risque d'erreurs plus grand dû à une pression plus importante sur le processus de décision du conducteur.

Enfin, on évoquera les conclusions de plusieurs études concernant les effets de dispositifs techniques ou de caractéristiques relevant de la sécurité primaire ou de l'amélioration du confort. Ces travaux mettent encore une fois en évidence des bénéfices nuls ou faibles, voire des effets potentiellement négatifs des dispositifs. Rumar, Berggrund, Jernberg et Ytterbom (1976) mesuraient à l'insu de conducteurs (suédois) les vitesses pratiquées sur circuit enneigés avec des véhicules équipés ou non de pneus cloutés et en inféraient les forces de frictions au niveau des pneus. Ils observent que les vitesses pratiquées ainsi que les forces de frictions augmentent pour les essais réalisés avec des pneus cloutés, annulant du même coup tout ou partie du bénéfice qu'apporte la présence de pneus cloutés sur la neige.

Selon Evans et Wasielewski (1983) ainsi que Wasielewski (1984), les possesseurs de véhicules plutôt récents pratiquent des distances inter-véhiculaires plus faibles et des vitesses plus élevées. Ceci est cohérent avec l'observation selon laquelle le taux d'accidents (avec dommages matériels uniquement ou avec blessures) des véhicules les plus récents (donc les mieux équipés en termes de sécurité et les plus confortables) est supérieur à celui des véhicules plus anciens même lorsque l'on tient compte de l'intervention possible de covariables comme l'âge, le sexe ou le kilométrage annuel (Fosser et Christensen, 1998, cités par Horswill et Coster, 2002). Ces différences de comportements pourraient s'expliquer en partie par l'amélioration du confort vibratoire et phonique dans les voitures récentes. Plusieurs études montrent en effet que les conducteurs de voitures bien isolées phoniquement évaluent moins bien la vitesse de leur véhicule (Evans, 1970; Horswill et McKenna, 1999; Matthews et Cousins, 1980). Un autre élément d'explication pourrait être l'amélioration des capacités de freinage des véhicules modernes. On notera par exemple les travaux de Sagberg, Fosser et Saetermo (1997) qui montrent que la présence de l'ABS et d'Airbags est associée à des comportements plus agressifs et, en particulier, à des distances inter-véhiculaires plus faibles.

En résumé, il apparaît à travers cette rapide revue que le phénomène d'adaptation comportementale est bien réel, qu'il concerne des dispositifs variés comme la réglementation, la signalisation et le marquage au sol, les dispositifs techniques dans le véhicule visant à améliorer non seulement la sécurité primaire et secondaire mais également le confort. On soulignera enfin, que ce phénomène renvoie probablement à des mécanismes explicatifs variés. Ceci a conduit les chercheurs à élaborer des modèles explicatifs reposant sur des mécanismes eux-mêmes très variés. Cette grande variété a amené certains chercheurs à adopter une approche plus générale visant à créer une taxonomie fondée sur le sens et l'intensité du phénomène d'adaptation comportementale plutôt que sur les mécanismes explicatifs (Evans, 1985).

2. LES MODELES DE COMPENSATION DU DANGER

Les premiers modèles, les plus anciens, semblent attachés à la notion de risque à laquelle ils attribuent une fonction régulatrice. Les plus récents semblent plutôt s'intéresser à l'activité de conduite qui dépend des motivations et des processus définissant la régulation dynamique de l'activité cognitive.

Le modèle le plus connu est celui de **l'homéostasie du risque**. Élaboré par Wilde (1982), il suppose que le conducteur évalue à tout instant le risque qu'il soit impliqué dans un accident au cours de la conduite. Il compare ensuite ce niveau à un niveau cible généralement plus grand que zéro et procède aux ajustements nécessaires lorsqu'une différence (positive ou négative) apparaît. Le conducteur cherche à maintenir constant le niveau de risque perçu. Les facteurs susceptibles de faire évoluer ce paramètre sont, bien entendu, les capacités perceptives et notamment celles qui concourent à la perception du risque, les capacités qui concourent à la manœuvre du véhicule ou à la prise de décision mais également les caractéristiques de la situation routière (caractéristique du véhicule, vitesses des véhicules adverses, conditions météorologiques, etc.). *Une modification des conditions de sécurité et en particulier une amélioration de l'infrastructure, du véhicule ou de tout autre élément de la situation de conduite contribuerait à une baisse du risque perçu et appellerait une action « correctrice » augmentant ce dernier à plus ou moins long terme via une vitesse accrue, des distances inter-véhiculaires plus faibles, une sollicitation des capacités dynamiques du véhicule supérieure, une moindre vigilance, etc. A moins d'agir directement sur le niveau de risque ciblé par l'individu toute amélioration de la sécurité routière serait inutile et vouée à l'échec.*

Cette théorie a été assez critiquée, car peu argumentée au niveau des modèles psychologiques sous-jacents, même si elle était validée par un certain nombre de données comportementales.

Le **modèle du risque zéro** antérieurement proposé par Näätänen et Summala (1976) est un modèle plus complexe. Il se distingue du modèle de Wilde (1982) dans la mesure où, même si l'on y postule une régulation du comportement en fonction d'un risque perçu d'accident (ou de sanction), le comportement est ici réglé par rapport à un objectif de risque zéro. Le dépassement de ce seuil appelle à plus ou moins brève échéance les mécanismes de régulation du comportement. La persistance de comportements risqués serait liée à un décalage entre risque objectif et risque subjectif : décalage lié à des facteurs motivationnels, de l'hypovigilance, des erreurs d'évaluations, la personnalité ou les expériences du conducteur. On doit donc dans ce système s'attacher à ne pas abaisser le risque subjectif mais plutôt à l'augmenter. Il est également possible d'agir sur les compétences évaluatives, les motivations ou le degré d'activation physiologique.

Une lecture plus approfondie amène à penser que les auteurs essaient de démontrer que l'opérateur ne gère pas les risques faibles. La vraie raison est qu'il ne les perçoit pas. Il n'y a rien de volontaire dans ce phénomène, les résultats s'expliquant essentiellement par les mécanismes intimes de la perception visuelle. La cognition humaine ne serait pas équipée pour percevoir ces risques mineurs, et du coup, procéderait plutôt par déclenchement excessif de contrôle une fois franchi les seuils perceptifs. L'étude de la conduite en trafic dense donne un certain nombre d'arguments aux auteurs en montrant que les réactions sont plutôt tardives, et plutôt excessives en ampleur. L'analyse croise partiellement les modèles de Dörner sur la difficulté de la cognition humaine à travailler avec des contextes à évaluations non linéaires, et à changement d'objectifs fréquents. L'analyse donne un écho particulier aux approches de Gibson qui considèrent que le cerveau ne réagit qu'aux seules informations « qui font sens » par rapport à ses hypothèses d'actions : le conducteur par exemple ne réagirait pas à une taille

d'objet (une valeur d'angle dans la stimulation visuelle), mais plutôt au taux d'expansion de cet angle visuel qui permettrait de percevoir directement (sans faire intervenir des mécanismes d'évaluation consciente du risque) le temps restant avant contact avec l'objet (voir les travaux très importants de Lee, 1976).

Fuller (1984) insiste sur la capacité du conducteur à anticiper le danger dans son **modèle de l'évitement de la menace**. L'expérience du risque subjectif étant dissuasive, le conducteur serait plutôt motivé à éviter les situations susceptibles de déclencher une telle expérience et ainsi de procéder par anticipation aux ajustements comportementaux appropriés. Autrement dit, le conducteur préférerait éviter la menace, tâche dont la difficulté clef serait de repérer dans la situation routière courante les signes précurseurs de ce danger et en particulier de repérer des configurations routières indiquant des dangers potentiels. Le conducteur n'évaluerait donc pas les situations en termes de probabilités subjectives d'occurrence d'un accident. Par ailleurs, les actions d'évitement seraient renforcées par un feed-back provenant de la situation et montrant qu'elles étaient bien nécessaires et, à l'inverse, elle ne serait pas renforcée en l'absence d'un tel feed-back.

Fuller a proposé plus récemment (Fuller 2000, 2002) un modèle qu'il désigne comme un **modèle d'homéostasie de la difficulté de la tâche**. Les conducteurs réguleraient la difficulté de la tâche de conduite en faisant en sorte qu'elle reste dans des limites acceptables. L'intervalle de difficulté initialement accepté dépendrait essentiellement des motivations du conducteur et de ses capacités, au moins tel qu'il les perçoit. Le niveau de difficulté serait régulé en temps réel en fonction des demandes de la tâche et des capacités du conducteur. Les demandes de la tâche évolueraient en fonction du trafic, de l'environnement routier, des caractéristiques du véhicule, de la vitesse pratiquée, etc. Les capacités du conducteur dépendraient de ses dispositions à long terme (temps de réaction minimal potentiel, acuité perceptive, etc.) et de ses compétences (directement fondées sur son éducation et son entraînement à la conduite ainsi que sur son expérience) et de facteurs transitoires que l'auteur désigne par l'expression de facteurs humains et qui renvoient essentiellement à la fatigue, la vigilance, les émotions et le stress, les états induits par l'usage de substances psycho-actives, etc. Au cas où la difficulté de la tâche serait perçue ou anticipée par le conducteur comme supérieure à ses limites d'acceptation, il agirait en adoptant une conduite moins exigeante par rapport à ses capacités et par rapport à la situation (ex : en augmentant la distance inter-véhiculaire ou en réduisant sa vitesse). Au cas où le niveau perçu de difficulté serait inférieur au niveau ciblé par le conducteur, il adopterait au contraire une conduite plus exigeante et prendrait ainsi plus de risques.

Ce modèle pourrait donc expliquer le phénomène de compensation du danger. Le conducteur adoptera des comportements objectivement plus risqués s'il considère que ses capacités sont élevées ou que les demandes de la tâche sont faibles. L'amélioration des caractéristiques du véhicule ou de l'infrastructure qui, comme on l'a vu, détermineraient la perception des demandes de la tâche, mais aussi la perception par le conducteur de ses capacités à faire face aux demandes de la tâche, aurait pour conséquence l'adoption de comportements plus risqués. La lutte contre cet effet résiderait donc dans des dispositifs instaurant l'illusion que la tâche est plus difficile. Les solutions sont assez aisées à imaginer. Un certain nombre est d'ailleurs déjà mis en œuvre concernant l'infrastructure ou la formation des conducteurs. Certains dispositifs techniques en développement pour les voitures pourraient également se révéler agir sur les variables évoquées par Fuller, comme par exemple le déclenchement d'une alerte sonore lorsque le temps inter-véhiculaire est en dessous du seuil réglementaire de 2 secondes.

Ajoutons enfin que Fuller complète son modèle par le modèle d'homéostasie du risque afin de tenir compte des situations où le conducteur s'engagerait intentionnellement dans des

situations où il percevrait le risque d'être lui-même impliqué dans un accident comme supérieur à zéro.

Enfin, on évoquera le **modèle hiérarchique d'adaptation comportementale** de Summala (1997). Ce modèle combine plusieurs dimensions d'analyse du comportement sur la route ce qui offre un cadre heuristique pour comprendre et interpréter les adaptations comportementales. Ces dimensions sont : le niveau de contrôle du véhicule (niveau stratégique, tactique, contrôle), le type fonctionnel de la tâche (gestion des distances intervéhiculaires, gestion des croisements, évitement d'obstacles, dépassement, etc.) et le niveau des processus cognitifs mis en jeu dans la tâche (contrôle automatisé de type sensori-moteur, processus attentionnel, activité consciente et supervisée). Le risque perçu en tant que variable régulatrice a disparu et est remplacé par : la vitesse, la gestion du temps disponible et la charge mentale. Ces trois variables sont gérées en fonction des motivations, des caractéristiques de la tâche, des activités secondaires en cours, des perceptions, etc. Le risque n'est plus qu'une conséquence de la façon dont le conducteur gère sa vitesse, les butées temporelles et sa charge mentale. L'auteur distingue deux types de mécanismes explicatifs de la compensation du risque : le niveau des décisions haut-niveau qui correspondent au choix du véhicule, du parcours, des conditions du trajet (météorologie, jour/nuit, etc.) et le niveau des routines de contrôle en temps réel de la conduite. Le premier type de mécanisme est le « lieu » des régulations sociales, culturelles, personologiques et motivationnelles. Le second type de mécanismes est affaire de régulations sur la base de variables perceptivo-motrices¹ (ex. : temps à l'obstacle, temps à la ligne, sensation d'accélération, de rotation, etc.). Bien entendu des liens très forts existent entre ces deux niveaux d'analyse : le choix d'un trajet de nuit sur un parcours sinueux aura des conséquences importantes sur la vitesse, les manœuvres à réaliser, les ressources à consacrer au cours de la conduite.

3. ORIGINALITE DE L'ETUDE

La plupart des modèles que nous venons de présenter, à l'exception du dernier qui amène à distinguer différents degrés d'automaticité et d'intentionnalité de l'adaptation comportementale, insistent sur une gestion motivée et consciente de la route, du risque et de la sécurité. On y parle de régulation des comportements motivés par rapport à des critères conscients de risque ou de difficulté de la tâche, par la mise en œuvre d'activités cognitives élaborées visant à l'identification du danger, l'élaboration d'un état des connaissances sur les capacités par rapport à la tâche à un moment donné, etc. Ceci est en décalage avec ce que nous savons de la conduite qui repose à 80% du temps sur des activités routinières et automatisées.

Les théories modernes, notamment les théories écologiques, mettent l'accent sur une régulation du risque largement confiée à des routines qui, le plus souvent, échappent à un guidage conscient. Les motivations interviendraient, bien entendu, mais agiraient sur le comportement global du conducteur par l'activation d'une série de routines antérieurement élaborées ou assemblées dans le cadre de ces motivations.

L'objet du projet présenté ici est en rupture par rapport aux modèles que nous venons d'exposer : il vise ces 80% d'activités routinières que nous évoquions.

¹ terme générique, couramment employé, et qui englobe les composantes cognitives et sensori-motrices de la perception.

Il s'agira d'étudier la formation dans le temps, à la bonne cible de performance et avec les bonnes protections internes, des routines de la conduite plutôt que d'étudier les effets d'une motivation de « sagesse » consciente de tous les instants.

Cette approche permet de découvrir les moyens d'assagir les conducteurs dans 80% de leur activité. Il restera les cas où le conducteur veut consciemment aller vite et déroger à la loi. Ces cas échappent sûrement à la cible de l'étude mais relèvent d'autres stratégies de prévention (pourquoi pas une meilleure perception du danger, ou la politique sanction) auxquelles d'autres chercheurs ont consacré des efforts fructueux.

4. ROLE DES FONCTIONS PERCEPTIVES EN CONDUITE AUTOMOBILE

La conduite automobile est souvent considérée comme une tâche reposant principalement sur les informations visuelles disponibles dans l'environnement. L'essentiel des études qui y sont consacrées s'intéresse à la modalité visuelle (Sivak 1996). Il est pourtant certain que la conduite implique des stimulations sensorielles variées qui s'adressent à d'autres organes que l'œil, comme les organes vestibulaires, tactiles et proprioceptifs (Kemeny et Panerai 2003). Ces stimulations peuvent être liées à la perception du mouvement du corps dans l'espace, ce qui relève de la kinesthésie. Il peut également s'agir des informations que le conducteur reçoit en retour de ses actions sur les commandes. Il s'agit là du domaine de la modalité haptique.

En prenant l'exemple de la conduite en courbe, le conducteur est soumis à des accélérations latérales qui ont plusieurs conséquences. Outre le fait de stimuler directement le système vestibulaire, elles s'exercent sur le corps entier et modifient de ce fait les forces de contact avec le siège, les commandes du véhicule, voire d'autres parties environnantes. L'hypothèse selon laquelle les informations non visuelles sont utilisées pour le contrôle de la trajectoire est appuyée par plusieurs expérimentations en simulateur de conduite à base fixe, c'est-à-dire sans stimulation inertielle. Dans ces conditions, les conducteurs sous-estiment systématiquement leur vitesse en courbe, adoptent des trajectoires plus serrées et opèrent des freinages beaucoup plus soutenus (Siegler, Reymond, Kemeny et Berthoz 2001). Blana et Golias (2002) ont également montré que le positionnement latéral du véhicule varie selon que le circuit (succession de virages en S) est parcouru en simulateur ou en conditions réelles. Ces résultats plaident sans aucun doute pour une implication des informations kinesthésiques dans le contrôle de la trajectoire. Selon Blana et Golias (2002), la réduction de la distance au bord de voie observée en simulateur à base fixe est également le signe d'une perception du risque altérée en l'absence d'information inertielle.

Les informations visuelles et inertielles ne sont pas les seuls signaux utilisés par le conducteur lors des prises de virage. Le conducteur contrôle la direction de son véhicule grâce au volant. Lorsqu'il exerce un couple sur le volant pour le faire tourner, il reçoit en retour un couple qui résulte des forces de contact qui s'exercent sur les pneumatiques (roues avant) et de l'arrangement cinématique du système de direction. Même si les véhicules récents, au travers des directions assistées, privilégient le confort en réduisant l'effort et la quantité de retour d'effort, cette information reste essentielle pour le contrôle du véhicule. Le retour de force est proportionnel à l'amplitude de l'angle au volant pour une vitesse, une courbure de virage et des conditions d'adhérence données. Dans une configuration classique, la force qui s'exerce sur les pneumatiques (et donc approximativement l'amplitude du retour de force) est proportionnelle à l'accélération latérale, avec des distorsions minimales (Essma 2000). Par conséquent, les retours de force sont porteurs d'informations relatives à la dynamique instantanée du véhicule.

Au-delà de la modulation du couple au volant, certains travaux cherchent à délivrer des alarmes haptiques au conducteur (vibrations dans le volant par exemple), avec l'idée qu'il pourrait s'agir là d'un moyen rapide et efficace de transmettre une information au conducteur sans passer par la modalité visuelle qui est largement sollicitée par ailleurs. Avec le développement de dispositifs "steer-by-wire" (découplage entre volant et colonne de direction), il est essentiel de mieux comprendre le rôle des retours de forces au volant afin que ceux-ci soient réalistes, mais également pour trouver de nouvelles façons d'assister le conducteur dans sa tâche.

Ce paragraphe justifie pleinement le fait de passer par une modulation du ressenti des accélérations transversales et, à notre connaissance, il n'y a pas eu récemment de publications majeures sur ce point.

5. HYPOTHESES

L'hypothèse proposée est qu'en agissant à un niveau pré-conscient sur les routines construites au travers de l'expérience de conduite, on pourra obtenir de la part des conducteurs une modification comportementale sub-consciente, pouvant moduler les phénomènes conscients et volontaires de l'adaptation comportementale.

Les travaux les plus modernes sur le contrôle cognitif du risque, largement développés hors du domaine de la conduite automobile, démontrent le rôle clé de deux variables sous-spécifiées dans les modèles que nous venons de présenter :

(i) le taux d'erreur résiduel accepté par le sujet et la notion de performance « suffisante ». L'opérateur cherche à atteindre de façon satisfaisante et sûre ses buts plutôt qu'à accomplir de façon systématique une performance maximale. Il préserve ses ressources pour d'autres activités en évitant de les consommer dans des optima locaux. Sa priorité va donc au résultat final plutôt qu'au parcours sans faute. Ce compromis performance / ressources est illustré par la notion de contrat de performance qui repose largement sur la connaissance par l'opérateur de son propre fonctionnement et de ses ressources cognitives. L'anticipation est ici une arme importante. On préfère éviter le problème plutôt que d'y réagir sous la pression du temps et avec des ressources limitées ;

(ii) les mécanismes de construction dans le temps de l'expertise et notamment l'automatisation des comportements, avec un lien dans la construction des routines avec l'expérience acquise dans la conduite consciente.

Les travaux sur la décision naturelle illustrent bien le premier point. On s'aperçoit en effet que les marges sont considérables dans les situations réelles. Les études sur la prise de décision naturelle (Klein, Oranasu, Calderwood et Zsombok, 1993) insistent par exemple sur la très grande relativité de l'importance des choix dans la vie réelle : presque toutes les décisions sont sous-spécifiées, non optimales (elles sont souvent quasiment routinières et inscrites dans l'environnement à travers un système d'affordance décisionnelle), voire fausses (par rapport à un cadre de jugement externe). Pourtant elles s'avèrent presque toujours suffisantes vues les marges des situations, et compte tenu de la possibilité de les ajuster en temps réel bien avant d'être en limite du domaine maîtrisable.

Sur le second point (routines), les travaux sur la construction de l'expertise et les relations entre conduite consciente et conduite automatique avaient été évoqués par Fuller (1994), mais avec une démonstration relativement limitée sur les mécanismes psychologiques.

Les travaux de psychologie cognitive sur la construction et le contrôle des routines ainsi que sur leur protection interne vis à vis des risques (Amalberti, 2001 ; Noizet et Amalberti, 2000, Zhang & Norman, 1994) amènent à formuler trois constats :

- l'exécution des manœuvres dans la conduite est progressivement déléguée à un cœur de routines dont le contrôle s'ancrerait dans des signaux (éventuellement des signaux d'alerte) construits par expérience ;
- le conducteur serait en permanence en quête d'un compromis cognitif entre domaines gardés sous contrôle conscient et domaines délégués aux routines d'exécution. Les secondes sont moins coûteuses en ressources cognitives et permettent donc de se consacrer à d'autres activités ;
- les parallélismes de la conduite seraient ouverts et les pôles d'intérêts de la cognition seraient diversifiés à la condition toutefois que les coûts cognitifs de cette ouverture et que la contrôlabilité immédiate de la situation soient compatibles avec les critères de définition d'une performance suffisante.

Ces trois points donnent aux travaux qui sont proposés ici leur caractère innovant.

Nous nous intéresserons à la question de savoir par quels processus les signaux (d'alerte) construits par expérience constituent finalement le point d'ancrage des routines de contrôle du véhicule.

On fait ici l'hypothèse que ce processus suivra quatre phases :

- La première phase sera une construction cognitive d'un domaine de performance sûr par confrontation à des expériences de sensation de perte de contrôle et une prise de conscience de signaux naturels (à majorité sensori-moteurs?) survenant à l'approche de cette perte de contrôle ;
- La seconde phase sera un « enfermement » volontaire de la performance dans un périmètre inférieur à ces signaux et l'identification d'une deuxième gamme de signaux cognitifs (cette fois construits) qui seraient pertinents pour signaler l'approche des limites du périmètre restreint reconnu comme sûr ;
- La troisième phase sera définie par la délégation aux routines par habitude du maintien de la performance dans cette zone sûre ;
- Enfin, ces routines sur les signaux bordant le territoire reconnu sûr pourront faire l'objet d'un contrôle dynamique ayant pour conséquence un fonctionnement aux limites "bruyantes" du domaine contrôlable. Il s'agirait en quelque sorte de mettre en œuvre les routines et d'exploiter les marges de sécurité au service de motivations et de buts spécifiques.

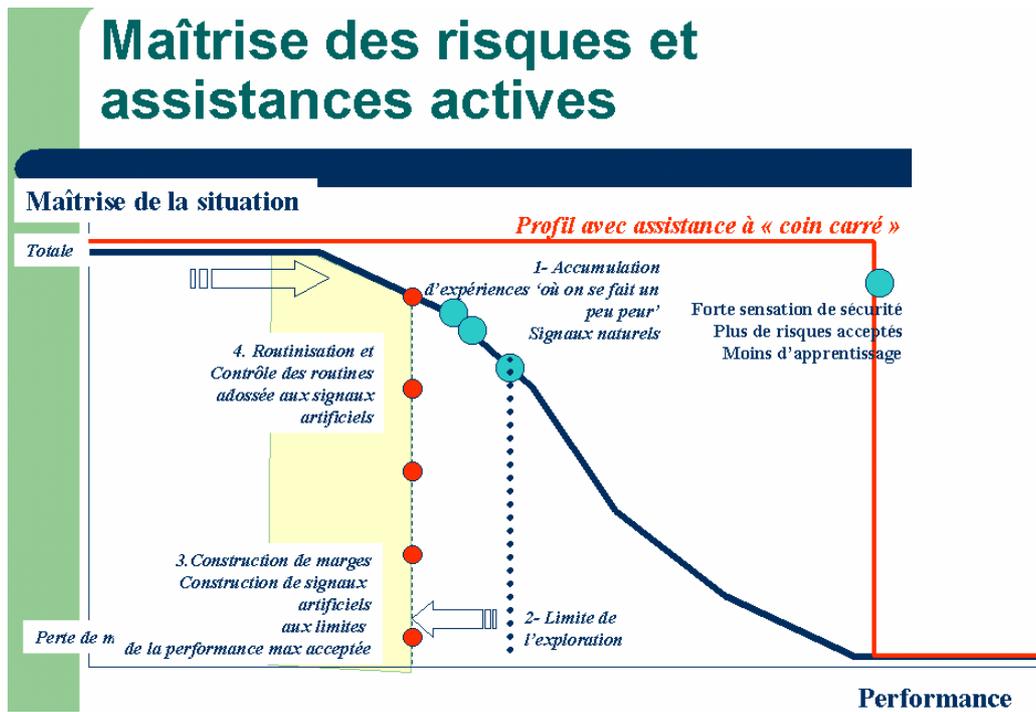


Figure 1: Principe du profil maîtrise-performance (avec et sans assistance à « coin carré » - (Amalberti, 2003) (exemple : Maîtrise = suivre la ligne médiane d'un virage ; Performance = vitesse de roulage dans le virage)

MATERIEL ET METHODE

1. SUJETS

1.1. Enjeux accidentologiques

Une analyse statistique menée par le LAB sur les accidents² dans lesquels seul un véhicule est impliqué, montre que :

- Les 25-54 ans sont impliqués dans 52 % des accidents ;
- Les conducteurs hommes sont impliqués à raison de 76 % ;
- 69 % des accidents surviennent hors agglomérations ;
- 63 % des accidents surviennent sur route nationale ou départementale ;
- pour ce type d'accidents, 10 % des victimes sont tués, 80 % sont blessés (dont 20 % gravement).

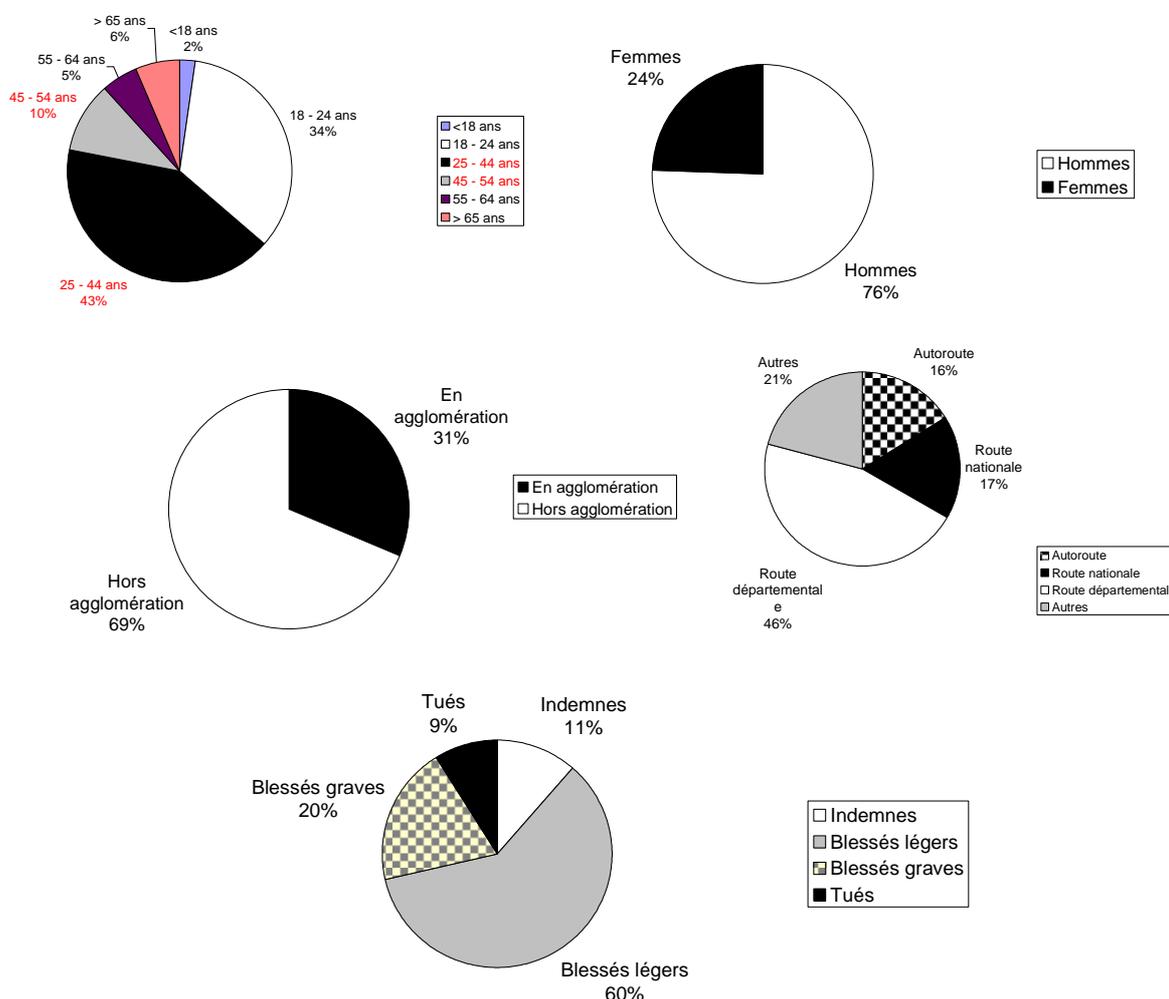


Figure 2 : Statistiques accidentologiques (accidents VP seul)

² Fichier SETRA2002, statistiques sur conducteurs impliqués dans les accidents avec un véhicule seul, sans piéton, ni 2 roues. Accidents représentant 13 % de l'ensemble des accidents. Attention, cette classification ne donne qu'une indication sur le type de collision, et non sur le déroulement ou l'origine de l'accident. Les accidents dus à une perte de contrôle sont sous-représentés dans cet échantillon.

1.2. Choix expérimentaux

La procédure légale concernant la recherche biomédicale sans bénéfice individuel a été respectée (le CCPPRB a émis un avis favorable au protocole expérimental de l'expérimentation). Chaque sujet signe préalablement à l'étude un consentement libre et éclairé et bénéficie d'une indemnité. Les séances de conduite ont fait l'objet d'un enregistrement vidéo. Il est demandé aux sujets de donner leur accord par écrit (ou d'exprimer leur refus) pour l'exploitation de ces enregistrements à des fins scientifiques.

Le recrutement des sujets a été fait par une société extérieure (A2S). La population est exclusivement masculine. Pour être admis à l'examen de pré-sélection, les sujets doivent :

- être âgés 27 et 52 ans ;
- être en possession du permis de conduire depuis 10 ans au moins ;
- parcourir plus de 12 000 km/an ;
- être indemnes de toute pathologie évolutive ;
- ne pas être des conducteurs professionnels.

Au total, 75 sujets ont été vus en visite de pré-sélection. 63 personnes ont été recrutées et 55 ont effectué finalement les 3 passations expérimentales. L'âge moyen de la population expérimentale est de 39 ans. Elle se distribue de la façon suivante :

| | Groupe 1 | Groupe 2 | Groupe 3 |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| Age médian (ans) | 39 | 39 | 39 |
| Age minimal | 29 | 28 | 27 |
| Age maximal | 52 | 52 | 49 |
| Kilométrage annuel moyen (km/an) | 20 000 | 16 500 | 20 000 |

Tableau 1 : Caractéristiques des 55 conducteurs participants

2. LES ALERTES

2.1. Solutions techniques

Le dispositif d'alerte devait restituer au sujet les sensations ressenties lorsqu'il approche les limites d'adhérence sur sol sec, et ceci avant qu'il s'en approche réellement. Lors d'un début de « glissade », les efforts transmis aux roues diminuent. Cela se traduit par une sensation de flou au niveau de la direction (les roues ne guident plus aussi nettement le véhicule), et, en virage, par une diminution de l'accélération transversale (force centrifuge) de la caisse, et donc par une diminution ressentie par le conducteur des efforts sur les bords de son siège.

Il a donc été choisi d'agir simultanément sur le volant et sur le siège afin de simuler ces sensations.



Figure 3 : Dispositifs concernés par l'alerte

Les collaborations internes avec les constructeurs automobiles français et d'autres sociétés externes ont permis de définir, puis de concevoir, deux systèmes d'alertes « naturelles » :

- **sur-assistance de la direction** : un flou artificiel (ou de sous-virage) a été introduit en augmentant rapidement et brièvement l'assistance de direction, rappelant le ressenti au passage sur une zone à adhérence dégradée. Seul le niveau d'assistance est affecté, pas le rapport de démultiplication. Le châssis et le comportement dynamique du véhicule ne sont donc pas dégradés autrement qu'au niveau du ressenti du conducteur (la sécurité est préservée) ;
- **siège conducteur à coussins pneumatiques** : il a été choisi d'augmenter le maintien latéral du siège dans les phases de conduite « normale », et de le diminuer grâce à des coussins gonflables lors des déclenchements d'alerte par « dégradation » légère, quasi imperceptible du confort suite au dégonflage des coussins d'appui au niveau de l'assise et du dossier. Ce système s'inspire donc de dispositifs existant chez la concurrence, mais en adoptant une philosophie et une mise en œuvre inversée (les sièges « multicontours dynamiques » de Mercedes augmentent le maintien en cas de conduite sportive, alors que le système mis au point ici fait exactement l'inverse).

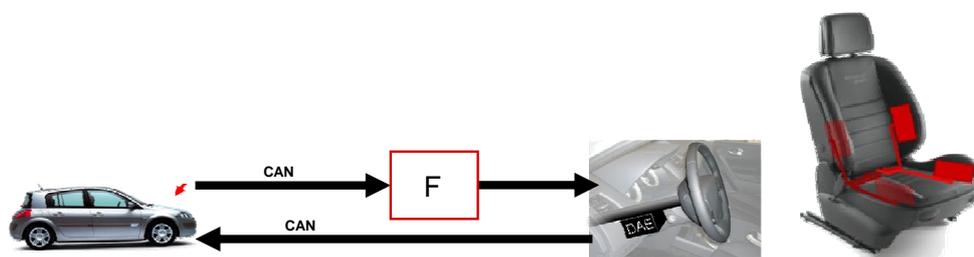


Figure 4 : Principe de commande de la DAE (direction assistée électrique) - Emplacements des coussins dans le siège actif

Le déclenchement simultané de ces 2 alertes se fait sur la base du dépassement d'un seuil sur l'accélération latérale (mesurée en temps réel). Un soin particulier a été apporté à la mise au point des alertes afin de n'affecter ni la confiance ni la sécurité. Sur la Figure 5, la frontière de couleur bleue discontinue représente les seuils de déclenchement en fonction de la vitesse). Des pré-expérimentations ont été menées fin juillet avec une dizaine de sujets.

2.2. Critère de déclenchement

Il est possible de définir et de détecter de nombreuses manières un dépassement des « limites ». Dans le cadre de cette étude, l'alerte naturelle devait se déclencher lors d'une utilisation soutenue du véhicule, mais sans non plus gêner le conducteur lorsqu'il se trouve dans une situation réellement délicate. Il a donc été choisi d'utiliser un critère qui ne traduit pas directement et en permanence l'approche de la limite (comme pour l'ESP, qui entre en action d'autant plus tôt que l'adhérence est dégradée), mais qui au contraire traduit **l'approche des limites dans des conditions idéales d'adhérence**.

C'est finalement en fonction d'un **seuil sur l'accélération transversale du véhicule dépendant uniquement de la vitesse que l'alerte se déclenche**. Elle n'intervient ainsi pas lors de situations réellement délicates sur faible adhérence mais précède en revanche l'intervention de l'ESP dans de bonnes conditions de roulage. Il s'agit donc bien d'un **système pédagogique et non pas d'une alerte d'un danger imminent**, qui aurait alors tout intérêt à être beaucoup plus explicite.

Lors de la conduite, on observe que les conducteurs se placent naturellement dans une enveloppe d'accélération transversale décroissant avec la vitesse (Reymond, 2001), même si on sait par ailleurs que la vitesse a en fait peu d'influence sur l'accélération transversale supportable par les pneumatiques (Gillespie, 1992). L'alerte naturelle suit ce modèle et sa marge de sécurité augmente donc avec la vitesse.

L'étude de profils de conduite de conducteurs obtenues lors d'une expérimentation précédente, menée par le LAB sur le contrôle transversal sur route, a permis de définir a priori un seuil de déclenchement (cf. Figure 5, en noir). Celui-ci a été tracé de manière à ce que l'alerte ne se déclenche jamais pour les sujets les plus calmes mais intervienne pour les sujets dont la conduite avait été jugée assez « sportive ». Ce seuil a ensuite été relevé et affiné lors d'une phase pré-expérimentale (en bleu sur la Figure 5) afin de s'adapter au profil de la piste, au véhicule utilisé, et aux consignes qui allaient être données aux sujets lors de l'expérimentation.

Lorsque le seuil était dépassé, l'alerte était déclenchée au niveau du volant et du siège et se déroulait une seule fois. Pour qu'elle intervienne à nouveau, il fallait repasser sous le seuil de déclenchement puis le dépasser à nouveau.

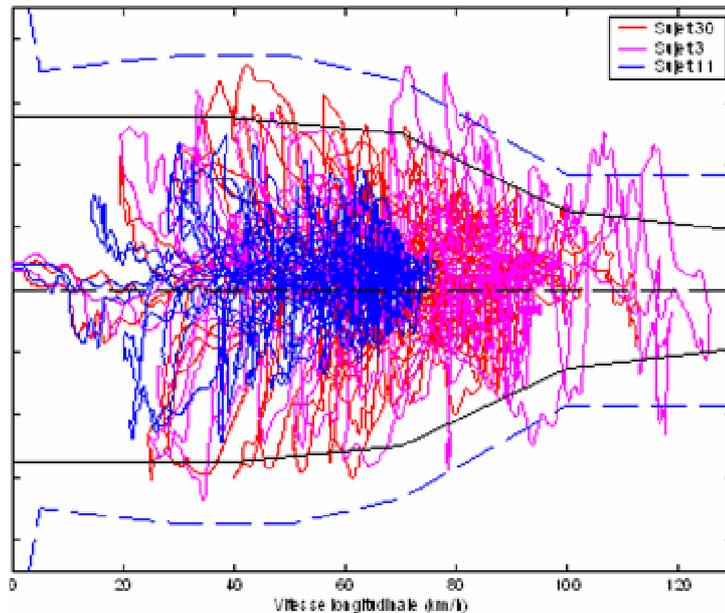


Figure 5 : Profil d'accélération transversale de 3 conducteurs sur un parcours sinueux

2.3. Réalisation technique

Siège actif

La société R-Konfort, qui a déjà réalisé par le passé des sièges pneumatiques pour Renault a équipé un siège de quatre coussins gonflables dans les bourrelets latéraux. La centrale pneumatique a été adaptée afin de déclencher un dégonflage des coussins d'un côté du siège (sur une commande [0 +5V]). Cette commande était réalisée par le PC embarqué qui prenait également en charge l'acquisition de toutes les données nécessaires et pilotait la direction assistée du véhicule pour la deuxième partie de l'alerte.

Le dégonflage était réalisé par la mise à l'échappement des deux coussins du côté sur lequel le sujet était en appui, pendant 3s, à la suite desquelles les coussins étaient progressivement remis en pression. Ceci rendait donc la vitesse de dégonflage et le ressenti même du maintien largement dépendants de la corpulence du sujet. En outre, les coussins ayant été adaptés sur un siège de série sans modification de la structure, le confort du siège était dégradé à la fin de l'expérimentation (irrégularités et points durs dans les bourrelets latéraux du siège) et l'efficacité du gonflage inférieure à ce qu'elle aurait pu être (manque d'appui à l'arrière des poches gonflables).

Direction

Les contraintes de temps de conception et de réalisation ont imposé d'interférer avec un système de direction assistée électrique (DAE) entièrement de série afin de le forcer à augmenter le couple d'assistance momentanément.

L'asservissement du moteur électrique de la DAE dépend d'informations fournies par des capteurs propres au calculateur de direction, mais aussi de données fournies par d'autres calculateurs par l'intermédiaire du bus CAN. Comme il était impossible de modifier la logique de fonctionnement du calculateur et de lui rajouter une commande permettant de déclencher l'alerte, nous avons choisi de modifier en temps réel ses données d'entrée afin d'exploiter l'asservissement déjà existant et obtenir l'effet voulu. Il a également fallu adapter

le paramétrage du calculateur lui-même afin que les altérations apportées en entrée aient un effet « maximum ».

Une passerelle CAN logicielle a donc été conçue et intégrée au système gérant déjà les acquisitions de données. Elle transmet en permanence et en temps réel (latence inférieure à 5ms, pour des messages donc la fréquence est au maximum de 100Hz) les messages envoyés par le reste du véhicule à la DAE, mais aussi ceux envoyés par la DAE au reste du véhicule. Parmi les messages transmis à la DAE, certains étaient modifiés en fonction de l'algorithme qui détectait les dépassements du seuil de déclenchement de l'alerte et qui gérait également le dégonflage du siège.

Lors d'un déclenchement, le couple d'assistance atteignait rapidement une valeur maximum correspondant à l'assistance fournie lors d'une manœuvre de parking. Il restait à cette valeur pendant 1.5s avant de diminuer progressivement pendant 1.5s pour rejoindre la valeur correspondant à l'asservissement habituel.

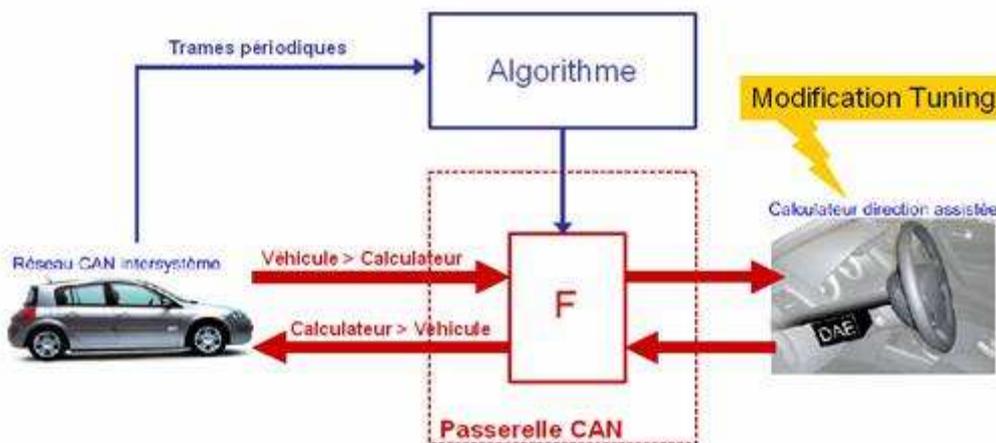


Figure 6 : Réalisation de la sur-assistance au volant

3. INSTRUMENTATION DES VEHICULES

Au total, 3 configurations de véhicules sont testées :

1. véhicule "*ancien*" (Mégane I, phase I),
2. véhicule "*récent*" (Mégane II),
3. véhicule "*récent équipé d'une alerte naturelle*" (la même Mégane II).

Le rapport puissance/masse est sensiblement identique pour les 2 véhicules (+7% de « performance globale » en faveur de la Mégane II - Figure 7). En plus de la vidéo embarquée, les véhicules sont instrumentés afin d'enregistrer les actions des sujets sur les commandes ainsi que les paramètres dynamiques.

| MEGANE 1 - 1,6 L Année 1998 - 55000 km 66 kW / 137 Nm - 1060 kg | MEGANE 2 – 1,6 L Année 2004 - 3000 km 83 kW / 152 Nm – 1250 |
|---|--|
| Performance générale : 140 | Performance générale : 150 (+7%) |
|  |  |

Figure 7 : Caractéristiques techniques des véhicules d’essais

Pour des raisons de sécurité, les véhicules sont équipés d’un double pédalier (type auto-école) permettant au pilote, assis en place de passager avant, de prendre le contrôle du véhicule en cas de danger éventuel.

Les véhicules sont instrumentés afin d’enregistrer les actions des sujets sur les commandes dans les différentes situations, ainsi que les paramètres dynamiques. Les appareils d’acquisition et d’enregistrement embarqués de données, ainsi que les équipements de pilotage du double système d’alerte sont fixés de façon rigide et implantés de manière "transparente" pour le conducteur.

Quatre caméras à faible encombrement sont implantées dans l’habitacle pour filmer la route, le visage, les mains et les pieds du sujet (Figure 9). Un microphone permet d’enregistrer ses commentaires.

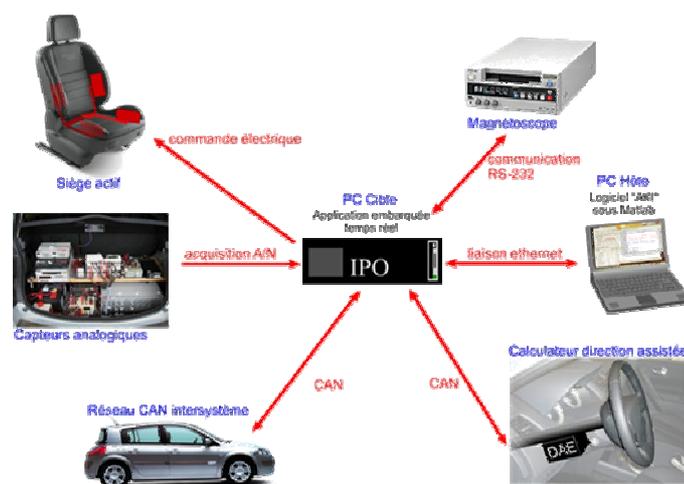


Figure 8: Chaîne d’acquisition des données et de pilotage des alertes



Figure 9 : Vue quad des enregistrements vidéo
(route, visage, pied et profil du conducteur)

4. MESURES

Les mesures réalisées sont de 2 types :

Actions conducteur :

- courses embrayage, accélérateur, frein
- angle et effort volant
- rapport de boîte, (et/ou régime moteur)

Dynamique véhicule :

- vitesses longitudinale et transversale
- accélérations longitudinale et transversale
- vitesse de lacet

Le système d'acquisition développé a permis d'incorporer les fonctions « alertes naturelles » et d'enregistrer de manière synchrone :

- des données analogique caractérisant le comportement du conducteur et la dynamique du véhicule ;
- une image vidéo présentant des vues de la route, du visage du sujet, de ses pieds, et de son attitude derrière le volant ;
- les paramètres de fonctionnement du dispositif « alerte naturelle » (pour la configuration « véhicule récent avec alerte »).

La fréquence d'échantillonnage utilisée par les applications embarquées était de 200Hz. Les voies analogiques, acquises par une carte National Instrument 16 voies / 16 bits après passage par un rack de filtre analogiques anti-repliements étaient en outre filtrées de manière

numérique (Butterworth d'ordre 3) avant leur exploitation. Les fréquences de coupure des filtres numériques apparaissent dans le Tableau 2.

| | Variables | Type de capteur | Unité | F _{coupure} (filtrage) |
|--|---|---|--------------------|------------------------------------|
| Variabes conducteur | Course accélérateur | Capteur à fil | mm | 50 Hz |
| | Course frein | Capteur tige inductif | mm | 50 Hz |
| | Embrayage enfoncé | Contact | 0 1 | - |
| | Angle volant | Potentiomètre rotatif | ° | 50 Hz |
| | Couple volant | Jauges de contrainte | N.m | 10 Hz |
| Variabes dynamiques | Vitesse longitudinale | Correvit | km/h | 5 Hz |
| | Dérive | Correvit | ° | 5 Hz |
| | Vitesse de Lacet | Gyromètre Sensorex | °.s ⁻¹ | 10 Hz |
| | Accélération longitudinale | Accéléromètre | g | 2 Hz |
| | Accélération transversale | Accéléromètre | g | 5 Hz |
| Autres variables | Frein copilote | Contact | 0 1 | - |
| | Top début tour | Cellule photoélectrique & bande réfléchissante | 0 1 | - |
| | Activation de l'alerte naturelle | <i>Logiciel</i> | 0 1 | - |
| Sur CAN (Véhicule Récent) | Variables | Résolution | Périodicité | |
| | Régime moteur | 16 bits | 10ms | |
| | Course accélérateur | 8 bits | 10ms | |
| | Contact frein | 0 1 | 10ms | |
| | Contact embrayage | 0 1 | 10ms | |
| | Angle Volant | 16 bits | 10ms | |
| | Vitesse Volant | 16 bits | 10ms | |
| | Vitesse longitudinale | 16 bits | 40ms | |
| | Accélération transversale | 16 bits | 20ms | |
| | Accélération longitudinale | 8 bits | 20ms | |
| | Vitesse de Lacet | 16 bits | 20ms | |
| | Pt Mort et Marche arrière | 0 1 | 20ms | |
| | Vitesse de rotation de chacune des 4 roues | 16 bits | 20ms | |
| | Régulation ABS, REF | 0 1 | 40ms | |
| Régulation ESP(AYC), ASR | 0 1 | 20ms | | |

Tableau 2 : Liste des paramètres enregistrés

5. PROTOCOL EXPERIMENTAL

5.1. Phase de recrutement

La sélection des participants se base sur un questionnaire ciblé suivi d'une visite médicale. La phase de recrutement intègre également des questionnaires administratifs (conformément à la loi Huriet-Sérusclat) et des questionnaires de caractérisation du sujet (DBQ, Typologie du conducteur, anxiété/dépression, estime de soi, confiance en soi...).

5.2. Phase expérimentale

A la suite d'une visite médicale, les sujets aptes à réaliser l'expérimentation en toute sécurité ont été convoqués pour 3 rendez-vous d'essais sur les pistes de Satory (78) d'août à octobre 2004. Le parcours était composé de 2 parties : une partie plutôt Nationale (ou routière) d'une longueur de 3,5 km regroupant plusieurs virages avec lignes droites et une

autre partie plutôt départementale sinueuse de 1,9 km (soit un total de 26 virages). Des panneaux de limitations de vitesses et des signalisations diverses ont été installés pour un meilleur réalisme de la route.

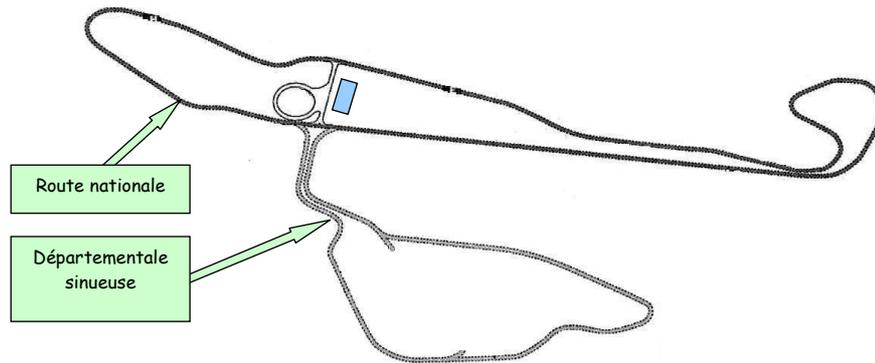


Figure 10 : Vue d'ensemble des pistes de SATORY

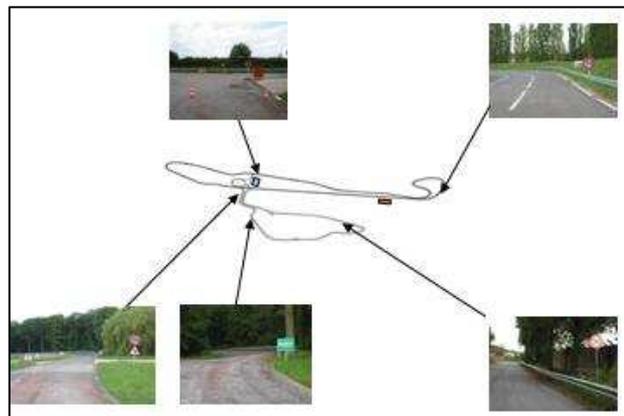


Figure 11 : Exemples d'habillage, signalisation et sécurisation du parcours

Les 55 conducteurs volontaires ont été répartis en 3 groupes homogènes (Groupe 1 ou G1, Groupe 2 ou G2 et Groupe 3 ou G3). Chaque groupe conduit le même véhicule pour 3 phases d'essais :

1. « **Familiarisation** » à l'univers expérimental (véhicule, parcours...), avec pour consigne de « conduire normalement comme sur la route » pendant une heure ;
2. « **Test** » d'évaluation du contrat de performance (consigne : « rouler pour rattraper le retard à un rendez-vous important, sans prendre de risque démesuré »). C'est pendant cette phase d'une heure que le groupe 3 est supposé s'approcher, voire dépasser les limites de déclenchement des alertes ;
3. « **Consolidation** » : mesure de l'adaptation comportementale et l'ancrage des routines de contrôle (consigne : « rouler normalement comme sur la route » pendant 30 minutes).

Afin de garantir la sécurité des sujets (et des expérimentateurs), les véhicules d'essais étaient équipés de leur systèmes de sécurité intrinsèques (air-bags, ABS, ESP...), en plus des doubles pédalier « style auto-école ». De plus, certaines zones sinueuses dangereuses du parcours ont été sécurisées par des glissières de sécurité.

| | Phase 1 Familiarisation | Phase 2 Test | Phase 3 Consolidation |
|---|--|--|---|
| Groupe 1 : Véhicule.1 (“ancien”) (N=19) | Développement des routines sur le lieu expérimental (Construction des références personnelles) | Contrat de performance Pression (consignes de performance) | Mesure des références spontanées consolidées Questionnement sur les représentations des niveaux de risque maximum ‘jouables’ |
| Groupe 2 : Véhicule 2 (“récent”) (N=17) | Pas de consigne, découverte des trajets et prises de repères sur les temps moyens nécessaires pour aller d’un point à un autre | Exploration forcée des marges du domaine de performance Ajustement des références personnelles du risque acceptable | Mesure des références Spontanées stabilisées après confrontation au risque |
| Groupe 3 : Véhicule 3 (“récent” avec alerte) (N=19) | Mesure de référence sans pression Vitesses spontanées en virage, traces, temps totaux | | |
| | 8 tours / sujet | 9 tours / sujet | 5 tours / sujet |

Tableau 3 : Description des 3 phases expérimentales

5.3. Hypothèses

L’objectif principal des analyses statistiques à venir est de tester les hypothèses suivantes :

En Phase 1, (familiarisation)

En dehors de toute consigne particulière, les vitesses pratiqués par les conducteurs du véhicule récent sont plus élevées que celles pratiquées par les conducteurs sur le véhicule ancien

En Phase 2, (test)

Avec une consigne induisant une contrainte de temps, les conducteurs vont augmenter leur vitesse quel que soit le véhicule considéré (ancien et récent). Cependant cette augmentation de la vitesse sera plus importante pour la voiture récente comparativement à l’ancienne.

De plus, les conducteurs du véhicule récent avec le système d’alerte présenteront une vitesse moyenne inférieure à celle du véhicule récent sans système d’alerte, elle restera plus importante que celle pratiquée par les conducteurs dans la voiture ancienne.

En Phase 3, (consolidation)

Sans consigne particulière, les vitesses pratiquées quel que soit le véhicule, vont diminuer par rapport à la phase de test dans laquelle les conducteurs avaient une contrainte de temps. La vitesse pratiquée par les conducteurs du véhicule récent avec le système d'alerte sera comparable à celle pratiquée par les conducteurs sur un véhicule ancien. C'est-à-dire que l'expérience de l'alerte aura eu pour conséquence de ramener la vitesse pratiquée dans un véhicule récent à celle pratiquée dans un véhicule ancien.

6. DONNEES RECUEILLIES

Au total, 165 essais (3 essais/sujet x 55 sujets) ont été réalisés, soit des données d'une taille d'environ 6.1 Go (x 3, si décompressées) et 147 heures d'enregistrements vidéo.

Un outil de post-traitement a été conçu (cf. Figure 12). Il permet de réaliser la préparation des données avant l'extraction des paramètres pertinents. Celle-ci se réalise en trois étapes :

1. **Repérage des voies défaillantes** (qui lorsque c'est possible sont remplacées par des données mesurées sur le réseau CAN du véhicule), et **définition des offsets** pour les capteurs. Un algorithme basé sur la répartition des données mesurées par chaque capteur permet de définir automatiquement le « zéro » le plus probable. Si le résultat de ce calcul automatique n'est pas satisfaisant, il est possible de sélectionner manuellement une zone censée correspondre au « zéro ». La moyenne de la valeur sur cette zone est alors attribuée à l'offset ;
2. **Découpage des tours.** Une cellule photoélectrique équipe les véhicules. Elle sert à détecter leur passage sur une bande réfléchissante disposée au début de chacun des tours. Cette cellule étant parfois défaillante, un algorithme de détection automatique des tours basé sur la vitesse et l'angle volant a été conçu. Une saisie manuelle est également possible pour gérer les cas où le protocole expérimental n'a pas été respecté. En outre, les portions pendant lesquelles le véhicule ne circule pas sur la piste (entre deux tours) sont éliminées des données traitées par la suite ;
3. **Découpage des virages.** L'ensemble des virages de la piste a été détecté. Cette détection est basée sur l'analyse du rayon de courbure calculé à partir de la vitesse et de l'accélération transversale du véhicule, projeté sur la distance parcourue obtenue par intégration de la vitesse. Des zones de recherches pour chacun des virages ont été définies. A l'intérieur de ces zones, l'algorithme recherche le ou les minima du rayon qui définissent le point de corde (si plusieurs minima existent, cela signifie que le conducteur a adopté une trajectoire irrégulière, cf. Figure 13. Le point de corde et le rayon de courbure du virage choisi correspondent alors au barycentre de ces différents minimums). L'algorithme détecte ensuite les points d'entrée et de sortie des virages en recherchant de chaque côté du point de corde des points de rebroussement ou des asymptotes (rayon tendant vers l'infini). La détection automatique n'étant pas toujours possible, le logiciel de post-traitement autorisait également une saisie manuelle. En cumulant tous les sujets, 31 925 passages en virage ont été détectés, vérifiés manuellement, puis caractérisés.

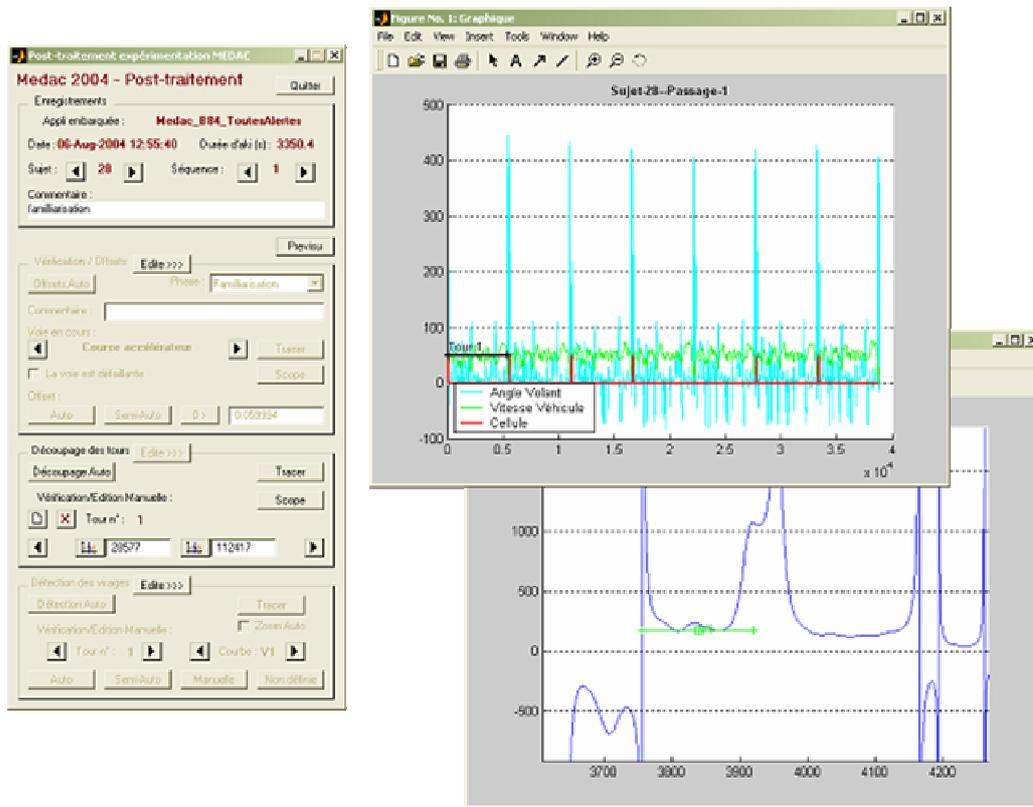


Figure 12 : Outil de post-traitement

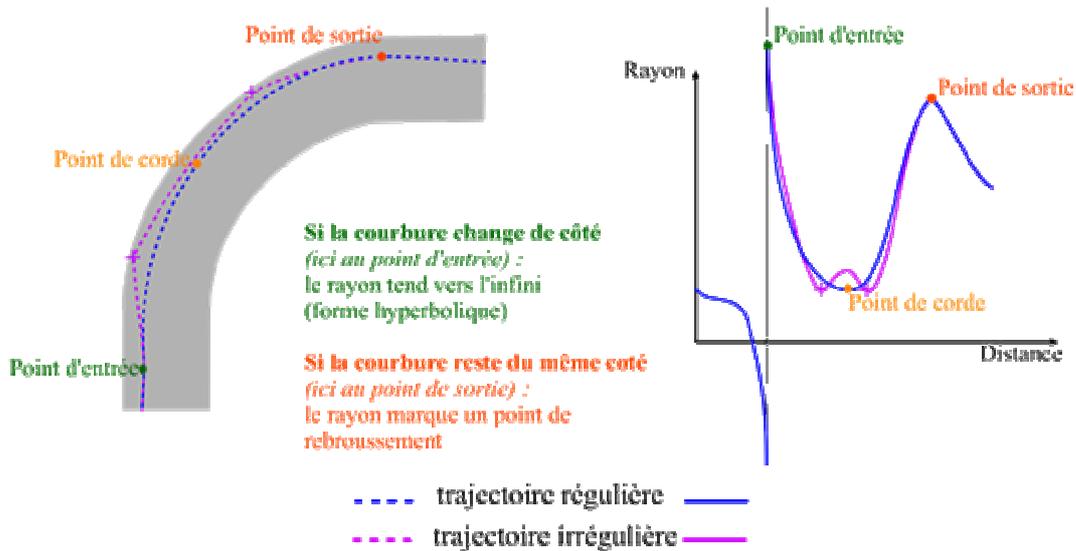


Figure 13 : Rayon de courbure et détection des virages

7. PARAMETRES EXTRAITS

7.1. Paramètres macroscopiques (par tour)

La vitesse moyenne au tour (*VmoyTour*) est le paramètre le plus global permettant de caractériser le comportement du conducteur et sa performance. Un découpage grossier basé sur l'enregistrement l'accélération transversale³ a été réalisé afin de distinguer les virages des portions de ligne droite. Deux paramètres ont été définis à partir de ce découpage :

- **VmoyVG** : *Vitesse moyenne sur les portions de courbe ;*
- **VmoyLD** : *Vitesse moyenne sur les portions de ligne droite.*

L'utilisation du système d'alerte naturelle a également été caractérisée pour chacun des tours avec les trois variables suivantes :

- **NbDeclAlerte** : *Le nombre de déclenchements de l'alerte ;*
- **PrctDureeAlerte** : *Le pourcentage de la durée de chaque tour pendant lequel l'alerte est en activation (volant et siège ne sont pas dans leur état de « repos ») ;*
- **PrctDureeDpsmtSeuil** : *Le pourcentage de la durée de chaque tour pendant lequel le seuil de déclenchement de l'alerte (seuil sur AT dépendant de la vitesse) est dépassé.*

Ces paramètres correspondent à des déclenchements réels de l'alerte pour les sujets du groupe 3 (véhicule récent avec alerte naturelle), et aux déclenchements qui auraient eu lieu pour les véhicules des deux autres groupes s'ils avaient été munis du même dispositif.

Des paramètres caractérisant pour chacun des tours les profils d'accélération transversale et longitudinale et donc les sollicitations dynamiques des véhicules ont également été extraits. Néanmoins, l'étude détaillée au niveau des virages et portions de ligne droite rend leur exploitation inutile.

L'expérimentation étant focalisée sur le contrôle transversal, peu de paramètres ont été extraits dans les lignes droites. Ceux-ci visent à évaluer si, malgré les chicanes rajoutées, les sujets profitent d'elles pour rattraper le temps perdu dans les virages. Dans le cas où le système aurait une influence sur le passage en virage, il était aussi intéressant de vérifier s'il a un effet similaire en lignes droites. Les paramètres choisis sont les suivants :

- **LD_Vitesse Max** : *Vitesse longitudinale maximum atteinte dans la ligne droite ;*
- **LD_ALMin** : *Accélération longitudinale minimum dans la ligne droite.*

En valeur absolue, cela caractérise la valeur maximum de décélération du véhicule.

- **LD_ALMax** : *Accélération longitudinale maximum dans la ligne droite.*

Cette accélération est d'autant plus importante que le sujet exploite une grande partie (sinon toutes) des possibilités d'accélération du véhicule.

³ Les zones où l'accélération transversale est supérieure en valeur absolue à 0.1g pendant plus de 2s sont considérées comme des zones de courbes.

Afin de rendre l'utilisation de ces paramètres plus précise, le profil d'accélération le long de la ligne a également été pris en compte à l'aide des paramètres suivants :

- **LD_posi_Vitesse Max** : *distance entre le début de la ligne droite et l'endroit où la vitesse longitudinale maximale est atteinte, rapporté à la longueur totale de la ligne droite ;*
- **LD_posi_ALMin** : *distance entre le début de la ligne droite et l'endroit où l'accélération longitudinale minimale (décélération maximale) est atteinte, rapportée à la longueur totale de la ligne droite ;*
- **LD_posi _ALMax** : *distance entre le début de la ligne droite et l'endroit où l'accélération longitudinale maximale est atteinte, rapportée à la longueur totale de la ligne droite ;*
- **LD_dist_80pctAccelMax** : *distance parcourue entre le début de la ligne droite et l'endroit où 80% de l'accélération maximale est atteinte ;*
- **LD_dist_80pctDecelMax** : *distance parcourue entre l'endroit où la décélération repasse en dessous de 80% de la décélération maximale atteinte et la fin de la ligne droite.*

7.2. Paramètres microscopiques (par virage)

Les virages ont été découpés en deux parties (cf. Figure 14) : Entrée (du point d'entrée au point de corde) et sortie (du point de corde au point de sortie). Certains paramètres ont été extraits sur l'ensemble du virage, d'autres uniquement sur l'entrée ou la sortie.

Les paramètres qui ont été exploités⁴ sont les suivants :

- **VG_ATMax** : *Accélération transversale maximale atteinte dans le virage ;*
- **VG_DeclAlerte** : *Présence d'un déclenchement d'alerte dans le virage. (Réel pour le groupe 3, simulé pour les autres) ;*
- **VG_Rayon** : *Rayon de courbure minimum (point de corde) de la trajectoire réelle ;*
- **VG_VitessePointDeCorde** : *Vitesse longitudinale au point de corde.*

4 D'autres paramètres, moins pertinents, ont été calculés mais n'ont pas été exploités : vitesse longitudinale en entrée et en sortie, décélération maximale, accélération maximale, présence d'un freinage et/ou d'une accélération dans les phases d'entrées et de sortie du virage, angle volant maximum, vitesse volant de braquage, de débraquage, dépassement du seuil de déclenchement de l'alerte naturelle, déclenchement et régulation des équipements d'aide à la conduite (ASR, AYC, ABS), vitesse de lacet et dérive maximum...

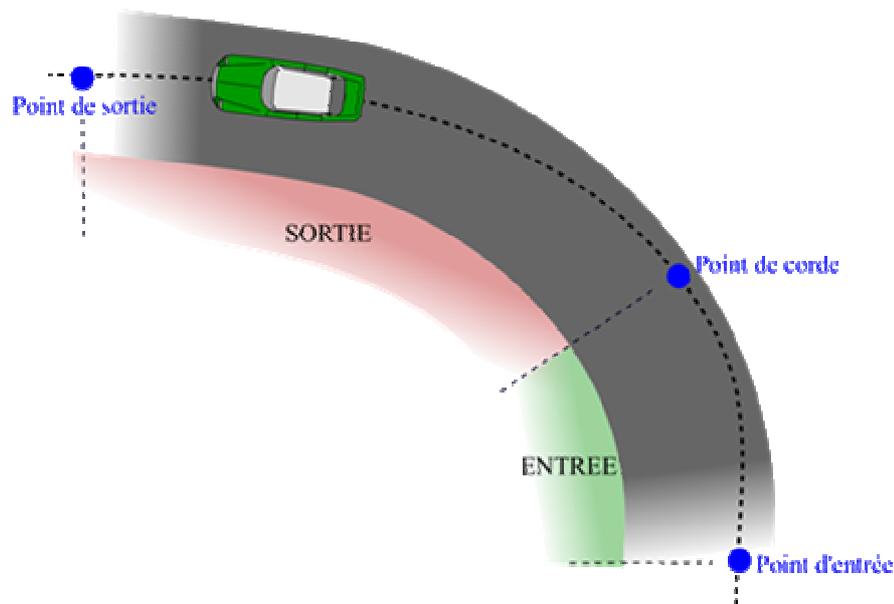


Figure 14 : Découpage des virages

8. METHODOLOGIE DE TRAITEMENT STATISTIQUE

Le test de la validité des hypothèses choisies a été réalisé grâce aux analyses statistiques des paramètres macroscopiques et microscopiques les plus pertinents. Pour le paramètre « *vitesse moyenne par tour* », comme pour tous les autres paramètres, ces analyses ont suivi la méthodologie suivante (7 étapes) :

1. *Validation des calculs, identification des données manquantes et ajustements* : Par exemple, pour la *vitesse moyenne par tour*, toutes les données pour le véhicule ancien ont été modifiées en retranchant 0.3 km/h (problème d'offset) ; Les données du sujet 65 ont été perdues pour les tours 4, 5 et 6 dans la phase de test, elles ont été remplacées par celles des tours 7 à 9.
2. *Nombre de tours* : Seuls les 4 premiers tours ont été réalisés par tous les sujets dans toutes les phases. En réalisant les analyses sur les 5 premiers tours des phases de familiarisation et de test, au lieu de 8 et 9 tours respectivement, seul un sujet sera supprimé de l'analyse pour n'avoir effectué que 4 tours dans la phase de familiarisation. Cette procédure permettra également d'évaluer les performances des sujets dans un plan complètement équilibré : véhicules³ × tours⁵ × phases³. L'analyse sur l'ensemble des tours pour chaque phase sera également réalisée pour l'évaluation du modèle d'apprentissage (familiarisation) dans chaque phase de test.
3. *Données extrêmes* : Les graphiques ci-dessous montrent la répartition de la *vitesse moyenne* pour chaque sujet en fonction des tours et du type de véhicule. Les sujets 66 (véhicule « récent ») et 73 (véhicule « modifié ») présentent des données extrêmes pour l'ensemble des tours. Cependant, seul le sujet 73 a été identifié comme conducteur sportif et a déclenché le système d'alerte avec une fréquence élevée durant les phases de familiarisation et de consolidation. Les analyses seront conduites en incluant et en éliminant les données de ce sujet.

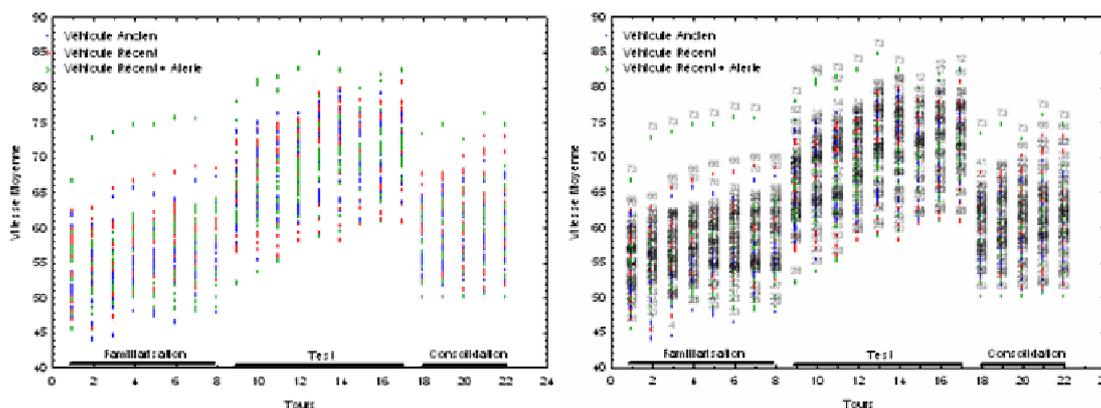


Figure 15 : Répartition de la vitesse moyenne pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule. Le graphique de droite identifie les sujets par leur numéro.

Homogénéité des groupes : La répartition des âges dans les 3 groupes présente un équilibre satisfaisant ne nécessitant pas de réajustement ou d'analyse par sous-groupe. La répartition du nombre d'années de conduite, bien que n'ayant pas fait l'objet d'un contrôle lors du recrutement, présente un bon équilibre à travers les 3 groupes. Cette variable est fortement corrélée avec l'âge des sujets puisque l'âge d'obtention du permis de conduire se situe dans une fourchette très serrée pour l'ensemble des sujets (moyenne : 19.98 ans, écart-type : 2.31), il n'y a pas de différence significative entre les 3 groupes pour cette variable ($F[2,51] = 0.30$, $p = 0.74$). La variable kilométrage annuel, non contrôlée lors du recrutement, peut être considérée comme aléatoire et les légères différences observées entre chaque groupe peuvent être testées statistiquement ($F[2,51] = 0.98$, $p = 0.38$).

| | N | Moyenne | Ecart-type | Minimum | Maximum | 1er Quart | Médiane | 3 Quart |
|----------------|----|---------|------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Ancien | 19 | 39,8 | 7,3 | 29 | 52 | 33 | 39 | 46 |
| Récent | 16 | 38,7 | 6,5 | 28 | 52 | 34 | 39 | 41,5 |
| Récent Modifié | 18 | 39,1 | 6,9 | 27 | 49 | 33 | 40 | 45 |

Tableau 4 : Age pour chaque groupe de sujet

| | N | Moyenne | Ecart-type | Minimum | Maximum | 1er Quart | Médiane | 3 Quart |
|----------------|----|---------|------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Ancien | 19 | 20,1 | 7,4 | 10 | 32 | 13 | 20 | 25 |
| Récent | 17 | 19,0 | 6,0 | 9 | 29 | 14,5 | 19,5 | 23,5 |
| Récent Modifié | 18 | 18,5 | 7,2 | 6 | 28 | 12 | 19,5 | 25 |

Tableau 5 : Nombre d'années de conduite pour chaque groupe de sujet

| | N | Moyenne | Minimum | Maximum | 1er Quart | Médiane | 3 Quart |
|----------------|----|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Ancien | 19 | 18421 | 7890 | 2000 | 32500 | 12000 | 20000 |
| Récent | 17 | 16360 | 5687 | 2000 | 25000 | 15000 | 18000 |
| Récent Modifié | 18 | 20388 | 12984 | 1000 | 60000 | 15000 | 20000 |

Tableau 6 : Nombre de kilomètres parcourus annuellement

4. *Test d'homogénéité des variances* : Le test de Brown & Forsythe (1974) a été préféré au test de Levene, parce que plus robuste dans le cas de groupes non-balancés (i.e., effectifs différents). On ne trouve aucune différence significative entre les variances des 3 groupes pour l'ensemble des variables dépendantes, que le sujet 73 soit inclus ou non. Le tracé des moyennes vs. les écarts-types ne montre pas de corrélation positive entre ces 2 facteurs : une transformation des données s'avère donc inutile.
5. *Test de normalité (de Kolmogorov-Smirnov et Lilliefors)* : Seule une variable du groupe "Véhicule Ancien" présente une distribution significativement différente de la normale avec le test de Lilliefors (différence non significative avec le test de Kolmogorov-Smirnov). On observe le même phénomène dans les groupes "Véhicule Récent" et

"Véhicule Modifié", toutefois en excluant les données du sujet 73 toutes les variables présentent une distribution proche de la distribution normale.

6. *Test de sphéricité de Mauchley pour les sources de variation intra (Phases, Tours & Phases \times Tours)* Ce test a été appliqué à l'ensemble des facteurs répétés (Tours, Phases & Phases \times Tours). Les facteurs "Tours" et "Phase \times Tours" ne remplissent pas la condition de sphéricité. Par conséquent, leurs effets seront évalués par un modèle multivarié. Les approximations de Greenhouse-Geisser et de Huynh-Feldt pourront également être données pour le modèle univarié.

RESULTATS

1. RESULTATS MACROSCOPIQUES

1.1. Vitesse moyenne par tour

1.1.1. Test de l'hypothèse 1

Les graphiques semblent montrer une vitesse moyenne plus faible avec le véhicule ancien qu'avec les 2 autres véhicules. L'hypothèse étant émise a priori, elle peut être testée par un contraste linéaire planifié : $\Psi: -2\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 0$

Cette comparaison est à tendance significative lorsque le sujet 73 est inclus dans l'analyse, $F[1,50] = 2.97$, $p = 0.09$. Lorsque ce sujet est exclu de l'analyse, la comparaison n'est plus significative, $F[1,49] = 2.55$, $p = 0.12$.

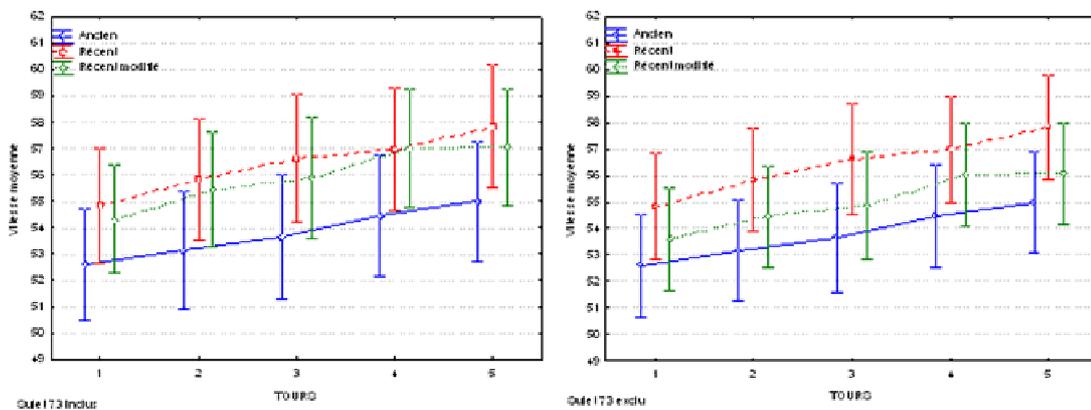


Figure 16 : Vitesse moyenne pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation pour les 3 groupes, sujet 73 inclus (gauche) et exclu (droite)

Remarque :

Il est curieux de constater que durant la phase de familiarisation la vitesse moyenne du véhicule modifié semble se situer à un niveau intermédiaire entre la vitesse moyenne du véhicule ancien et celle du véhicule récent. Les véhicules récent et modifié devraient avoir des performances comparables lorsque le système d'alerte du véhicule modifié reste inactif, sauf pour 3 sujets qui l'ont déclenché 2 à 4 fois, et le sujet 73 qui l'a mis en régulation environ 40 fois. L'exclusion de ces 4 sujets ne change pas les différences observées dans le graphique de droite. Cet effet n'est pas significatif mais il est à noter qu'il se manifeste pour chacun des 5 tours. Un éventuel biais expérimental n'est pas à exclure.

1.1.2. Test de l'hypothèse 2

On n'observe aucune différence entre les 3 groupes pour la phase de test (voir Figure 17) des comparaisons a posteriori de Newman-Keuls pour les 3 groupes en phase de test).

Le contrôle (analyse en covariance) des variables âge, nombre d'années de conduite et nombre de kilomètres parcourus annuellement, n'explique pas l'absence d'effet de groupe pour la phase de test.

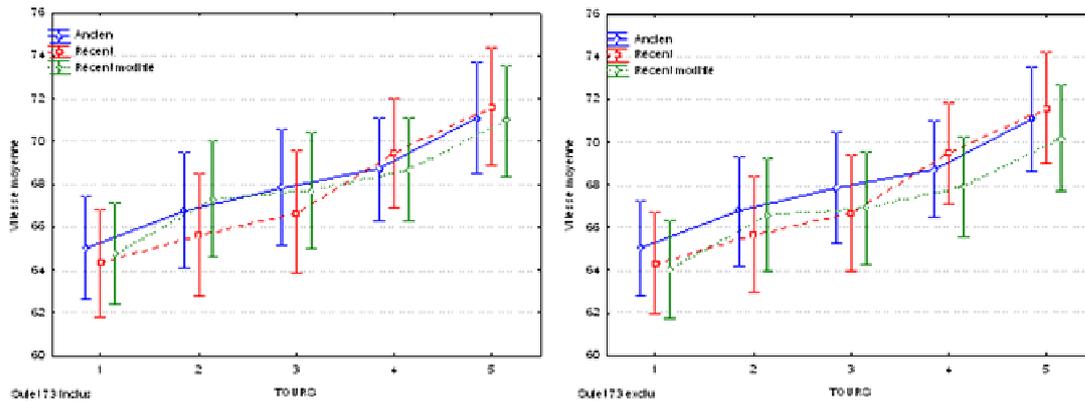


Figure 17 : Vitesse moyenne pour les 5 tours de la phase de test et pour chaque type de véhicule, sujet 73 inclus (gauche) et exclu (droite).

| Sujet 73 inclus | Récent | Récent modifié |
|-----------------|--------|----------------|
| Ancien | 0.96 | 0.97 |
| Récent | | 0.99 |

| Sujet 73 exclu | Récent | Récent modifié |
|----------------|--------|----------------|
| Ancien | 0.95 | 0.99 |
| Récent | | 0.96 |

Tableau 7 : Probabilités des comparaisons a posteriori entre les 3 groupes (phase de test).

1.1.3. Test de l’hypothèse 3

L'effet de la phase est significatif, les comparaisons a posteriori montrant une différence significative entre les groupes Familiarisation/Test, Familiarisation/Consolidation et Test/Consolidation à .001 avec le test de Scheffé (le plus conservateur). La vitesse moyenne des 3 groupes est significativement plus élevée en phase de consolidation qu'en phase de familiarisation. Rappelons que ces analyses ont été menées avec les 5 premiers tours de chaque phase pour un gain de puissance. Une analyse incluant l'ensemble des tours pour les 3 phases donnent des résultats similaires.

| | Lambda Wilks | F | dl Effet | dl Erreur | p |
|-----------------------|--------------|----------|----------|-----------|----------|
| Groupe | | 0.7 | 2 | 49 | 0,514431 |
| Phase | 0,115806 | 183,2427 | 2 | 48 | 00 |
| Phase × Groupe | 0,926493 | 0,9339 | 4 | 96 | 0,447751 |
| Tour | 0,178586 | 52,8948 | 4 | 46 | 00 |
| Tour × Groupe | 0,844769 | 1,0121 | 8 | 92 | 0,432602 |
| Phase × Tour | 0,297125 | 12,4193 | 8 | 42 | 00 |
| Phase × Tour × Groupe | 0,813225 | 0,5718 | 16 | 84 | 0,896542 |

Tableau 8 : Tests univariés et multivariés pour les facteurs groupes, phase et tour et les interactions entre ces 3 facteurs (sujet 73 exclu)

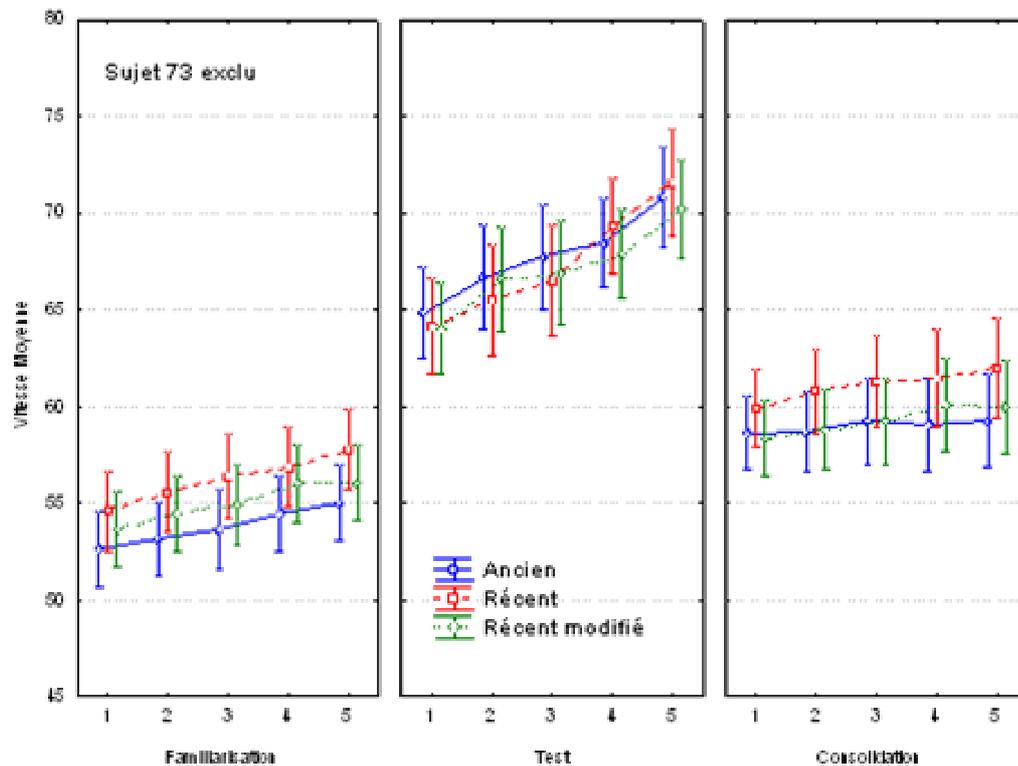


Figure 18 : Vitesse moyenne pour les 5 premiers tours de chaque phase et pour chaque type de véhicule

Etude de l'apprentissage : Modélisation par régression non-linéaire

Les 3 figures ci-dessous des vitesses moyennes pour les 3 phases de test et les 3 types de véhicule, semblent montrer une progression non-linéaire de la vitesse moyenne en fonction des tours. Les modèles d'apprentissage ont donc été estimés par un ajustement non-linéaire (Régression par méthode des moindres carrés). L'ajustement a été conduit sur la phase de familiarisation pour chaque véhicule. L'objectif étant de voir si les vitesses moyennes des tours suivants, notamment 18 à 22 (phase de consolidation), sont en accord ou non avec les prédictions du modèle. L'évaluation et la comparaison d'un modèle polynomiale et d'un modèle logarithmique, pour l'accroissement de la vitesse moyenne en fonction des tours, donnent une corrélation légèrement plus élevée pour le modèle logarithmique que pour le modèle polynomiale ($r = 0.26$ contre $r = 0.25$ respectivement).

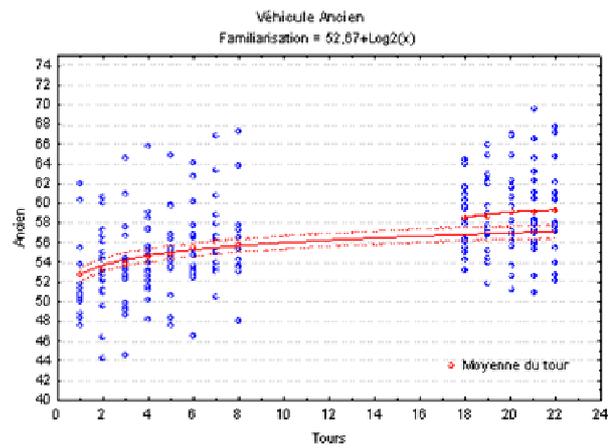


Figure 19 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule ancien, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation).

La courbe de régression logarithmique est ajustée sur les 8 premiers tours et est projetée jusqu'au tour 22. Les lignes en pointillés représentent les limites de confiance à 95% de la courbe de régression.

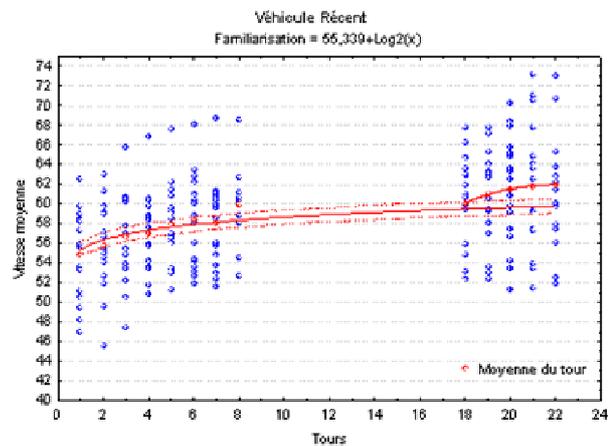


Figure 20 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule récent, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation).

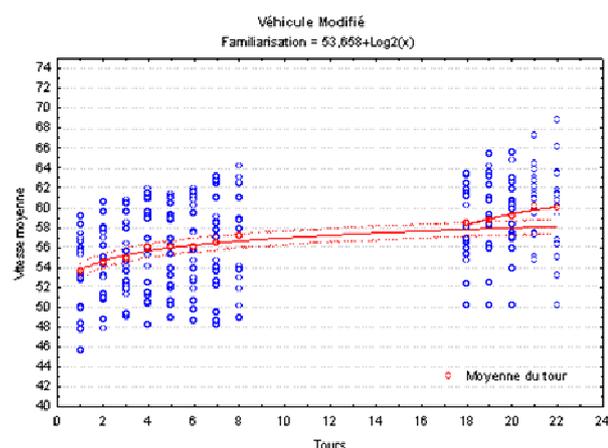


Figure 21 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule modifié, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation).

Pour le véhicule « ancien » on constate que le premier tour de la phase de consolidation est parcouru en moyenne 2 km/h plus rapidement que ce que prédit le modèle d'ajustement sur les 8 premiers tours. Cette différence n'est plus que de 1 km/h lorsqu'elle est rapportée à la

borne supérieure de l'intervalle de confiance de la fonction d'ajustement. Pour le véhicule « récent » et le véhicule « modifié », la vitesse moyenne du premier tour de la phase de consolidation est dans l'intervalle de confiance de la fonction d'ajustement de la phase de familiarisation.

Pour les 4 tours suivants de la phase de consolidation, sur chacun des 3 types de véhicules, la vitesse moyenne est supérieure à la vitesse prévue par le modèle. Il est à noter que le paramètre de la fonction d'ajustement (ordonnée pour $x = 1$) pour la phase de consolidation est plus élevé que celui de la phase de familiarisation. Le Tableau 9 donne les différentes fonctions d'ajustement pour chaque phase de test. Les modèles d'ajustement sont significatifs pour l'ensemble des véhicules et des phases de test, le pourcentage de variance expliquée étant toutefois très faible (0.4% - 9%).

| Familiarisation | Modèle tours 1 à 8 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------|----------------|
| <i>Ancien</i> | $y = 52.67 + \log_2(x)$ | 52.02 | 53.36 | < 0.01 | 0.25 | 0.06 |
| <i>Récent</i> | $y = 55.34 + \log_2(x)$ | 54.60 | 56.05 | < 0.01 | 0.29 | 0.09 |
| <i>Modifié</i> | $y = 53.66 + \log_2(x)$ | 52.95 | 54.36 | < 0.01 | 0.24 | 0.05 |
| Consolidation | Modèle tours 18 à 22 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
| <i>Ancien</i> | $y = 58.61 + \log_2(x)$ | 57,78 | 59,43 | < 0.01 | 0.07 | 0.004 |
| <i>Récent</i> | $y = 59,90 + \log_2(x)$ | 58,72 | 61,09 | < 0.01 | 0.12 | 0.01 |
| <i>Modifié</i> | $y = 57,91 + \log_2(x)$ | 57,07 | 58,74 | < 0.01 | 0.14 | 0.02 |

Tableau 9 : Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation

1.2. Vitesse moyenne en lignes droites et Vitesse moyenne en virages

1.2.1. Statistiques descriptives

Les graphiques ci-dessous donnent les vitesses moyennes en virages et en lignes droites pour l'ensemble des sujets en fonction du tour, et du type de véhicule. On observe que les données se répartissent de manière identique entre les 3 variables : *vitesse moyenne sur l'ensemble du tour*, *vitesse moyenne en virages* et *vitesse moyenne en lignes droites*. L'ensemble des analyses est conduit en excluant les données du sujet 73.

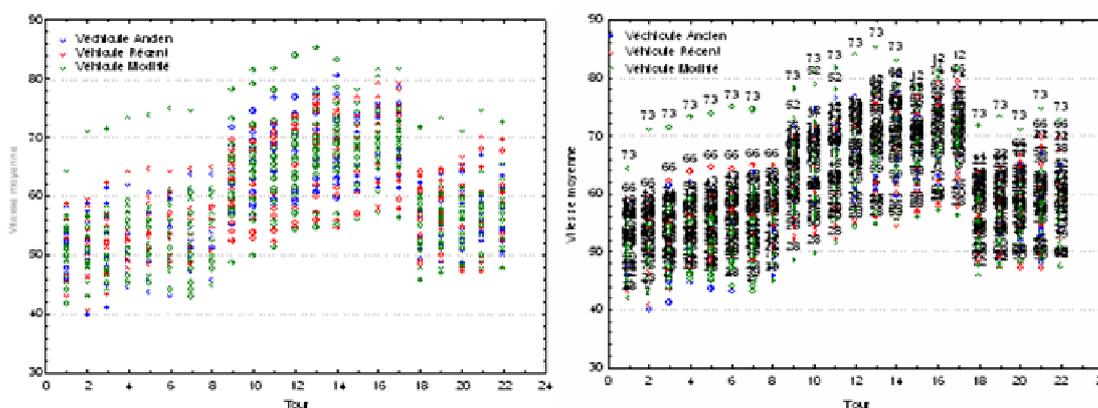


Figure 22 : Répartition de la vitesse moyenne en virages pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule (graphique de droite : identification par numéro)

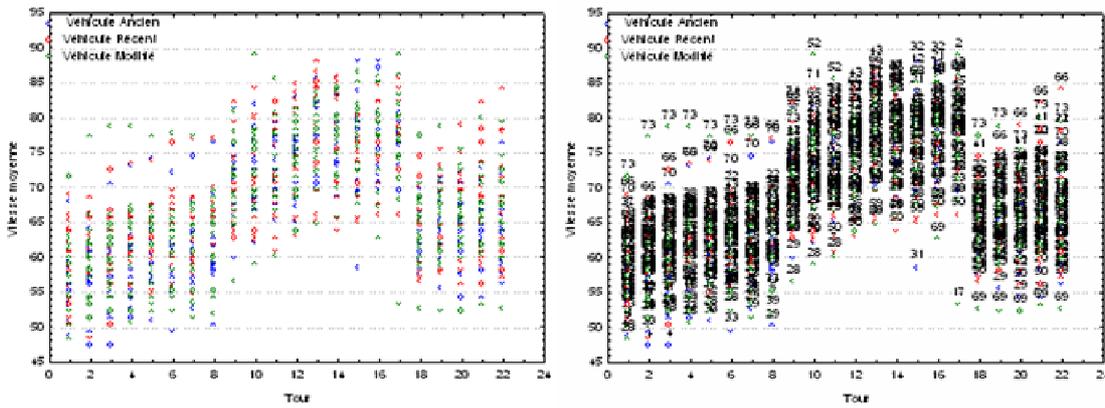


Figure 23 : Répartition de la vitesse moyenne en lignes droites pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule (graphique de droite : identification par numéro)

1.2.2. Test de l'hypothèse 1

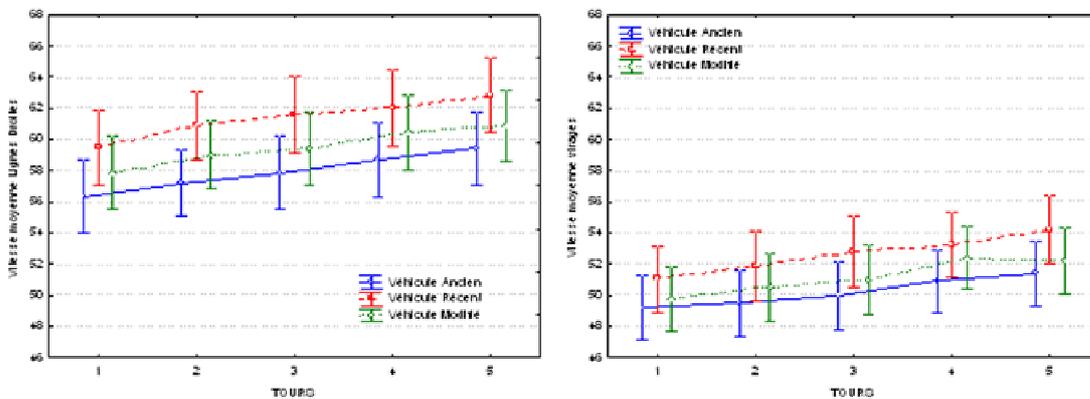


Figure 24 : Vitesse moyenne en lignes droites (à gauche) et en virages (à droite) pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation

La vitesse moyenne en lignes droites et en virages sur les 5 premiers tours de la phase de familiarisation semble être plus faible pour le véhicule « ancien » que les 2 autres véhicules. L'hypothèse étant émise a priori peut être testée par un contraste linéaire planifié :

$$\Psi_{\text{Lignes droites}} : -2 \mu_{\text{Ancien}} + \mu_{\text{Récent}} + \mu_{\text{Modifié}} = 0$$

$$\Psi_{\text{Virages}} : -2 \mu_{\text{Ancien}} + \mu_{\text{Récent}} + \mu_{\text{Modifié}} = 0$$

Cette comparaison est à tendance significative pour la variable lignes droites, $F[1,50] = 3.59$, $p = 0.064$. Pour la variable *virages* la comparaison n'est pas significative, $F[1,50] = 1.89$, $p = 0.18$.

Remarque 1 :

La même remarque concernant la position intermédiaire du véhicule « modifié » entre le véhicule « ancien » et le véhicule « récent », est à faire ici. En testant par un contraste linéaire cet ordre *Ancien < Modifié < Récent*, on observe une plus grande significativité que pour le contraste planifiant une équivalence entre le véhicule « récent » et le véhicule « modifié » :

$$\Psi_{\text{Lignes droites}} : -1 \mu_{\text{Ancien}} + 1 \mu_{\text{Récent}} + 0 \mu_{\text{Modifié}} = 0 \rightarrow F_{[1,50]} = 4.94, p = 0.031.$$

$$\Psi_{\text{Virages}} : -1 \mu_{\text{Ancien}} + 1 \mu_{\text{Récént}} + 0 \mu_{\text{Modifié}} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{[1,50]} = 2.82, p = 0.099.$$

Remarque 2 : Evolution de la vitesse en virages

L'évolution de la *vitesse moyenne en virages* ne traduit pas totalement la modification du comportement du conducteur en termes de prise de risque. En effet, une vitesse moyenne faible en virage peut-être compensée par une vitesse moyenne élevée en ligne droite. La Figure 25 donne le rapport entre la vitesse en virages et en lignes droites. Plus ce rapport est proche de 1, plus la vitesse en virages sera proche de la vitesse en lignes droites.

Pour un rapport proche de 1, deux interprétations peuvent être avancées : a) La vitesse moyenne sur l'ensemble du tour est relativement basse et il n'y pas de volonté d'augmenter sa vitesse en ligne droite par rapport aux virages, b) La vitesse moyenne sur l'ensemble du tour est élevée ce qui indiquerait que la vitesse en virages est élevée par rapport à la vitesse en lignes droites (i.e., grande prise de risque). Le test de la différence entre la *vitesse moyenne en virages* et la *vitesse moyenne en lignes droites* entre les 3 groupes n'est pas significatif. La différence entre la vitesse en lignes droites et la vitesse en virages doit également être interprétée en fonction de la vitesse globale des véhicules, parce qu'une différence faible (ou forte) entre les 2 variables, ne peut s'apprécier qu'en fonction de la vitesse globale du véhicule. Les tests réalisés ne montrent aucune différence statistique entre les 3 groupes.

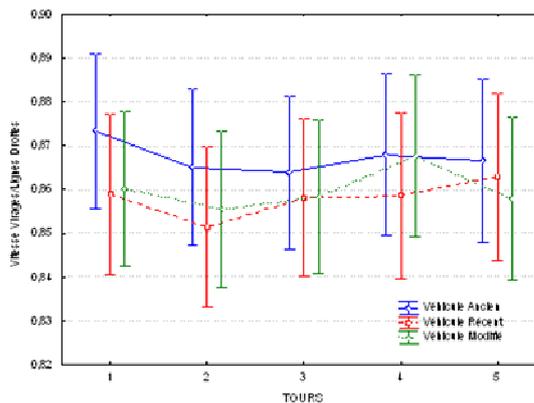


Figure 25 : Rapport (*vitesse moyenne en virages / vitesse moyenne en lignes droites*) pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation.

1.2.3. Test de l'hypothèse 2

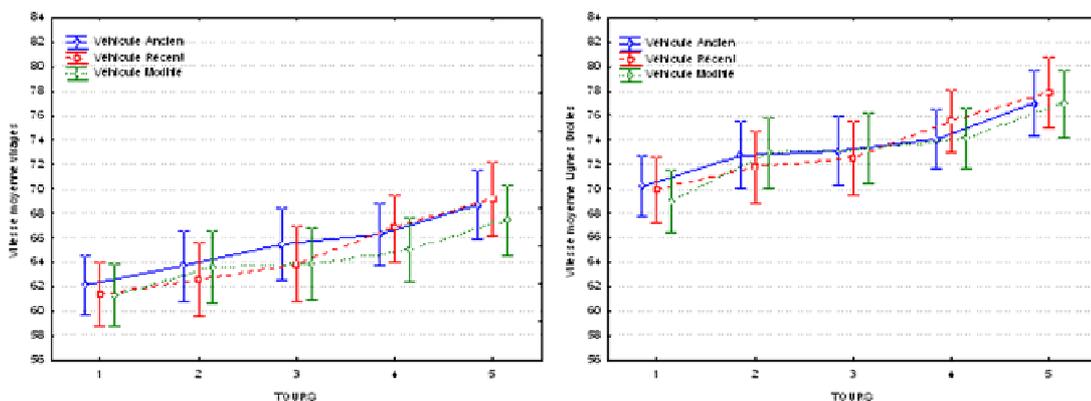


Figure 26 : Vitesse moyenne pour les 5 tours de la phase de test (en virages à gauche et en lignes droites à droite)

On n'observe aucune différence entre les 3 groupes pour la phase de test (Tableau 10).

| Virages | Récent | Récent modifié | Lignes Droites | Récent | Récent modifié |
|----------------|--------|----------------|-----------------------|--------|----------------|
| Ancien | 0,78 | 0,85 | Ancien | 0,95 | 0,94 |
| Récent | | 0,79 | Récent | | 0,99 |

Tableau 10 : Probabilités des comparaisons a posteriori entre les 3 groupes (phase de test) : comparaisons a posteriori (Newman-Keuls)

Le contrôle (analyse en covariance) des variables âge, nombre d'années de conduite et nombre de kilomètres parcourus annuellement, n'explique pas l'absence d'effet de groupe pour la phase de test.

1.2.4. Test de l'hypothèse 3

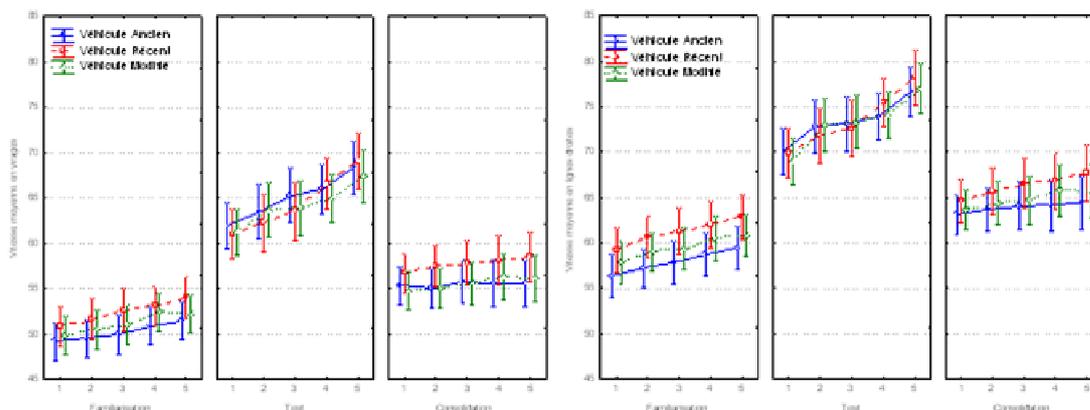


Figure 27 : Vitesse moyenne en virages (à gauche) et lignes droites (à droite) pour les 5 premiers tours

L'effet de la phase est significatif en virages et lignes droites (voir tableaux 3 et 4), les comparaisons a posteriori montrant une différence significative entre les groupes Familiarisation/Test, Familiarisation/Consolidation et Test/Consolidation à .001 avec le test de Scheffé (le plus conservateur). La vitesse moyenne des 3 groupes est significativement plus élevée en phase de consolidation qu'en phase de familiarisation.

Tout comme pour la vitesse moyenne sur l'ensemble du tour on constate graphiquement qu'en phase de consolidation, la vitesse est plus élevée pour le véhicule récent que pour les 2 autres véhicules qui semblent avoir des vitesses moyennes similaires. Cependant, ces différences ne sont pas significatives : Récent/Ancien ($p=0.91$) et Récent/Modifié ($p=0.69$) en virages; Récent/Ancien ($p=0.90$) et Récent/Modifié ($p=0.79$) en lignes droites (Test de Newman-Keuls).

| | Lambda Wilks | F | dl Effet | dl Erreur | p |
|-----------------------|--------------|---------------|----------|-----------|--------------|
| Groupe | | 0,5 | 2 | 49 | 0,596 |
| Phase | 0,112 | 190,64 | 2 | 48 | 0,000 |
| Phase × Groupe | 0,924 | 0,96 | 4 | 96 | 0,433 |
| Tour | 0,206 | 44,26 | 4 | 46 | 0,000 |
| Tour × Groupe | 0,791 | 1,43 | 8 | 92 | 0,194 |
| Phase × Tour | 0,294 | 12,59 | 8 | 42 | 0,000 |
| Phase × Tour × Groupe | 0,751 | 0,81 | 16 | 84 | 0,672 |

Tableau 11 : Tests univariés et multivariés pour les effets (facteurs groupes, phase, tour et les interactions entre ces facteurs) sur la vitesse moyenne en virages.

| | Lambda Wilks | F | dl Effet | dl Erreur | p |
|-----------------------|--------------|---------------|----------|-----------|--------------|
| Groupe | | 1 | 2 | 49 | 0,375 |
| Phase | 0,136 | 151,93 | 2 | 48 | 0,000 |
| Phase × Groupe | 0,952 | 0,60 | 4 | 96 | 0,662 |
| Tour | 0,172 | 55,45 | 4 | 46 | 0,000 |
| Tour × Groupe | 0,890 | 0,69 | 8 | 92 | 0,699 |
| Phase × Tour | 0,321 | 11,08 | 8 | 42 | 0,000 |
| Phase × Tour × Groupe | 0,834 | 0,49 | 16 | 84 | 0,942 |

Tableau 12 : Tests univariés et multivariés pour les effets (facteurs groupes, phase, tour et les interactions entre ces facteurs) sur la vitesse moyenne en lignes droites.

1.3. Analyses complémentaires

1.3.1. Effet Expérimentateur

L'analyse ne révèle pas d'effet significatif des expérimentateurs sur la vitesse moyenne de conduite, quelque soit la phase de test.

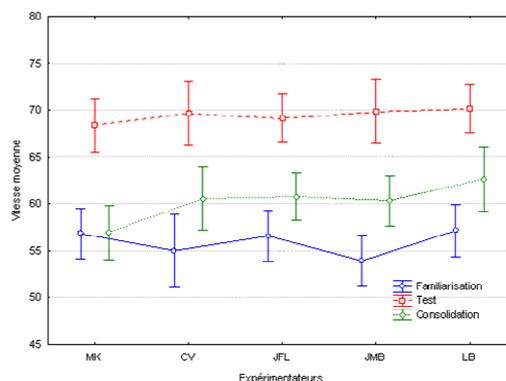


Figure 28 : La vitesse moyenne en fonction de l'expérimentateur ayant accompagné le sujet durant les 3 phases de conduite

1.3.2. Fréquence de Déclenchement de l'Alerte

L'analyse de la covariance pourrait être une méthode d'identification de la contribution de la variable « nombre de déclenchements » pendant la phase de test aux différences de vitesses entre les groupes pendant la phase de consolidation. Cependant, un seul groupe présente des valeurs pour cette variable (*véhicule modifié*) et les moyennes de la variable covariée (nombre de déclenchements) diffèrent trop entre les groupes, car nulles pour les groupes 1 et 2, pour pouvoir utiliser cette méthode.

Nous évaluerons donc la corrélation partielle entre la vitesse de conduite en phase de familiarisation (indicateur de la vitesse de base du conducteur), le nombre d'alertes (*réelles* ou « *fictives* ») pendant la phase de test, et la vitesse en phase de consolidation. Lorsqu'on évalue la corrélation partielle entre le nombre d'alertes et la vitesse en phase de consolidation, on donne la part de corrélation restante entre ces deux variables lorsque la part de corrélation de la troisième variable (vitesse en familiarisation) est écartée. Le nombre d'alertes « fictives » pour le véhicule ancien et le véhicule récent, correspond à un déclenchement théorique du système d'alerte que ces véhicules auraient présentés s'ils avaient été équipés du système d'alerte. Cette corrélation partielle permet de voir quelle est la part de la vitesse en

consolidation expliquée par la vitesse en familiarisation d'une part et le nombre d'alertes en phase de test d'autre part.

Les résultats montrent que seul pour le véhicule modifié, la vitesse moyenne en phase de consolidation est positivement corrélée au nombre d'alertes produites en phase de test. La corrélation partielle entre le nombre d'alertes et la vitesse en phase de consolidation est significative lorsque l'effet attribué à la vitesse de base (i.e., en phase de familiarisation) est neutralisé. Pour les 2 autres véhicules, le nombre d'alertes n'a pas de pouvoir explicatif significatif lorsque la vitesse initiale en phase de familiarisation est maintenue constante. Ceci tend à montrer que le système d'alerte joue un rôle significatif en phase de consolidation dans la vitesse adoptée par les sujets. La tolérance (comprise entre 0 et 1) exprime la redondance de la variable, plus ce coefficient est faible plus la variable est redondante par rapport aux autres variables.

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|---------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d'alertes | 0,14869 | 0,824016 | 0,175984 | 0,60144 | 0,55597 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,55008 | 0,824016 | 0,175984 | 2,63475 | 0,01802 |
| Véhicule Récent | Nombre d'alertes | 0,17731 | 0,692188 | 0,307812 | 0,67412 | 0,51122 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,56954 | 0,692188 | 0,307812 | 2,59259 | 0,02128 |
| Véhicule Modifié | Nombre d'alertes | 0,55312 | 0,841425 | 0,158575 | 2,65569 | 0,01727 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,61870 | 0,841425 | 0,158575 | 3,15009 | 0,00619 |

Tableau 13 : Corrélations partielles – Effet de l'alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne sur tout le parcours)

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|---------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d'alertes | 0,10096 | 0,67114 | 0,328864 | 0,40593 | 0,690175 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,56601 | 0,67114 | 0,328864 | 2,74634 | 0,014342 |
| Véhicule Récent | Nombre d'alertes | 0,12811 | 0,63345 | 0,366547 | 0,48333 | 0,636335 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,54554 | 0,63345 | 0,366547 | 2,43559 | 0,028831 |
| Véhicule Modifié | Nombre d'alertes | 0,61888 | 0,81635 | 0,183652 | 3,15159 | 0,006175 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,66957 | 0,81635 | 0,183652 | 3,60587 | 0,002370 |

Tableau 14 : Corrélations partielles – Effet de l'alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne sur toutes les lignes droites)

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|---------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d'alertes | 0,12391 | 0,952159 | 0,047841 | 0,49950 | 0,624225 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,53689 | 0,952159 | 0,047841 | 2,54559 | 0,021595 |
| Véhicule Récent | Nombre d'alertes | 0,25421 | 0,775421 | 0,224579 | 0,98347 | 0,342070 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,59099 | 0,775421 | 0,224579 | 2,74122 | 0,015917 |
| Véhicule Modifié | Nombre d'alertes | 0,47483 | 0,879260 | 0,120740 | 2,15812 | 0,046460 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,51868 | 0,879260 | 0,120740 | 2,42668 | 0,027421 |

Tableau 15 : Corrélations partielles – Effet de l'alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne dans tous les virages)

| Corrélation Nb Alertes/ Vitesse Phase Consolidation | R | R ² | F | DI | P |
|---|------|----------------|-------|------|-------|
| Véhicule Ancien | 0.36 | 0.13 | 2.61 | 1,17 | 0.12 |
| Véhicule Récent | 0.49 | 0.24 | 4.67 | 1,15 | 0.047 |
| Véhicule Modifié | 0.64 | 0.41 | 11.91 | 1.17 | 0.003 |

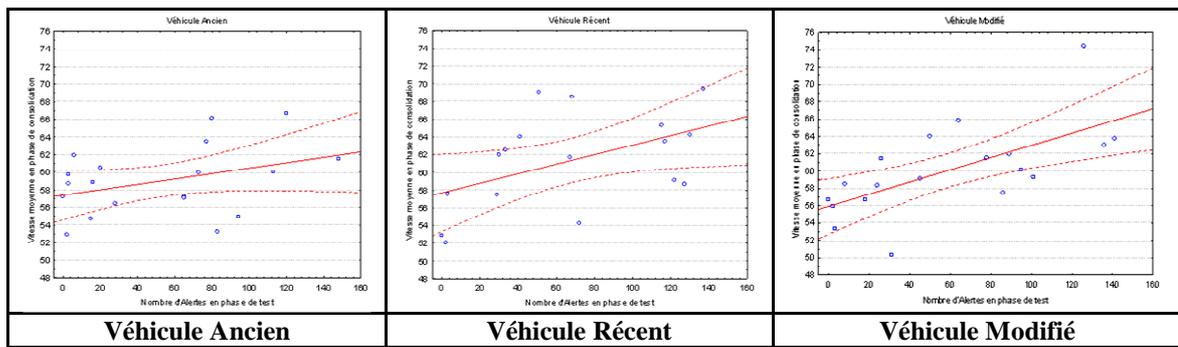


Figure 29 : Corrélations partielles entre le nombre d'alertes déclenchées en phase de test et la vitesse moyenne en phase de consolidation

1.4. Conclusions de l'analyse macroscopique

On observe les mêmes résultats pour la vitesse moyenne en virages et en lignes droites que pour la vitesse moyenne sur l'ensemble du tour. Ceci suggèrerait que **le système d'alerte n'a pas seulement un effet en virages** où il s'est déclenché majoritairement pendant la phase de test, mais que **l'effet du système d'alerte se répercute sur l'ensemble de la conduite** avec le *véhicule modifié*.

Concernant **l'influence de l'alerte sur le comportement du conducteur**, et en particulier sur la vitesse moyenne pratiquée, **l'effet est significatif uniquement avec le véhicule modifié**. Alors que le nombre « fictif » d'alertes pour les deux autres véhicules (*ancien* et *récent*) devrait refléter la vitesse des sujets en phase de test de la même manière que le nombre effectif d'alertes pour le *véhicule modifié*, on remarque que cet indice n'explique pas la vitesse des sujets en phase de consolidation pour les véhicules ne disposant pas du système d'alerte (*ancien* et *récent*). Cet indice n'est donc pas simplement une variable redondante avec la vitesse en phase de test qui serait corrélée avec la vitesse en phase de consolidation. Ceci est un argument fort en faveur d'un impact du système d'alerte sur la vitesse en phase de consolidation. Cette hypothèse est attestée par une corrélation plus forte pour le véhicule modifié que pour les deux autres véhicules, entre le nombre d'alertes déclenchées en phase de test et la vitesse moyenne en phase de consolidation

Une interprétation possible de cette forte corrélation serait que le lien entre les 2 variables serait simplement dû au fait que les sujets qui conduisent vite en phase de test déclenchent souvent le système d'alerte et que ce sont ces mêmes sujets qui conduisent vite en phase de consolidation. Ainsi le nombre d'alertes en phase de test ne serait qu'un simple indicateur de la vitesse des sujets pendant cette phase. Cet indicateur serait corrélé à la vitesse en phase de consolidation, c'est-à-dire une variable inhérente aux sujets et non à l'alerte ou au véhicule.

Par ailleurs, nous avons testé, de manière individuelle, la différence de vitesse (Δ_{vitesse}) pour chaque individu entre les 3 phases de conduite. Mais comme le montre plusieurs graphiques dans le rapport, les évolutions de vitesse ne diffèrent pas significativement entre les 3 types de véhicules (exemple : Figure 30 qui donne le Δ_{vitesse} moyen entre la phase de familiarisation et la phase de consolidation par type de véhicule). De plus, une simple corrélation entre le nombre d'alertes en phase de test et le Δ_{vitesse} ne permettrait pas de neutraliser la vitesse inhérente à chaque sujet. Avec ce type d'analyse, le nombre d'alertes ne représente qu'une seconde mesure de la vitesse des sujets adoptées en phase de test et on aboutit inmanquablement à une corrélation positive entre ces deux variables comme le montre la Figure 31 : ceci est contraire à la prédiction « corrélation négative ».

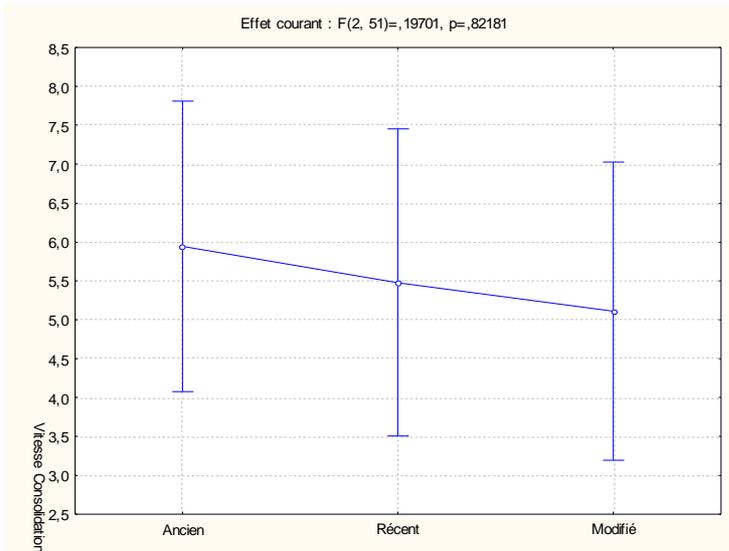


Figure 30 : Vitesse relative moyenne entre la phase de familiarisation et la phase de consolidation par type de véhicule

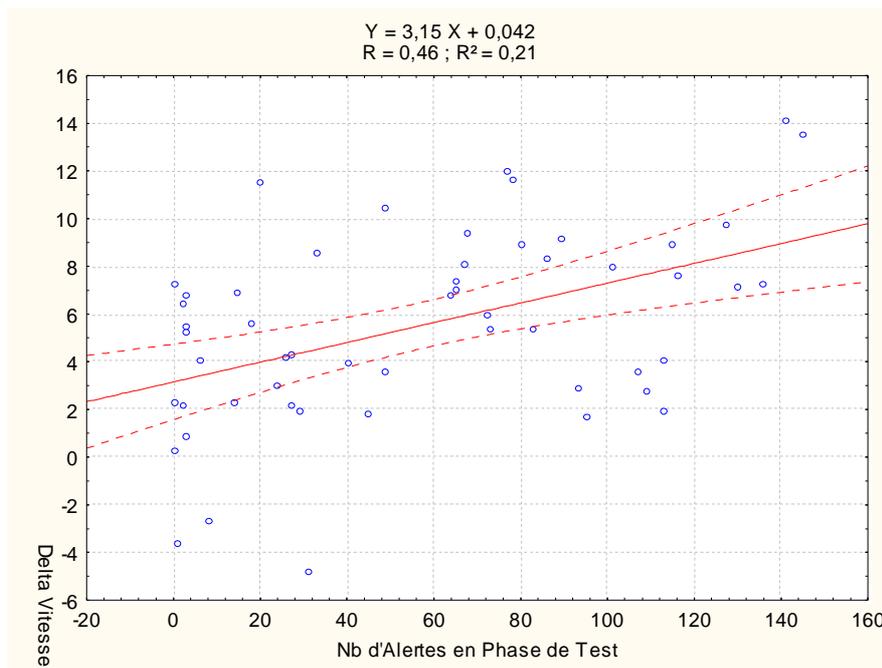


Figure 31 : Vitesse relative moyenne en fonction du noble d'alerte en phase de test

2. RESULTATS MICROSCOPIQUES

2.1. Traitement statistique des indices pour les virages

Les données pour 25 virages (1-7 & 9 – 26) et 17 lignes droites ont été analysées. Le sujet 73 présentant des données extrêmes a été exclu des analyses. 3 indices « classiques » en dynamique transversale ont été ainsi analysés : Vitesse au point de corde, Accélération Transversale et Rayon de Courbure.

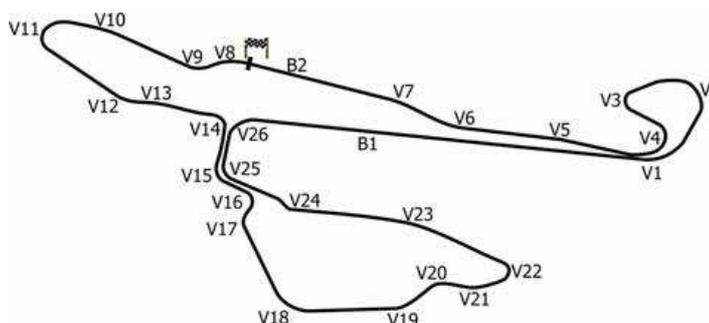


Figure 32: Virages sur parcours

2.1.1. Vitesse au point de corde

Statistiques générales :

Les analyses multivariées pour chacune des variables sont données dans le Tableau 16. **L'effet Groupe, absent du tableau, n'est pas significatif.** Seuls les virages, les phases de test et l'interaction entre ces variables ont un effet significatif sur la vitesse au point de corde. Cependant, la modification de la vitesse au point de corde en fonction des phases de test ne se fait pas de la même manière pour l'ensemble des virages. Les virages pris à une vitesse importante (supérieure à 60 km/h) semblent indiquer une plus grande différence entre les 3 groupes pour la phase de consolidation que pour les 2 autres phases.

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|-----------------------------------|------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Virages | Wilk | 0,002216 | 506,5936 | 24 | 27 | 0,000000 |
| Virages x Groupes | Wilk | 0,196719 | 1,4115 | 48 | 54 | 0,109525 |
| Phases | Wilk | 0,108164 | 202,0077 | 2 | 49 | 0,000000 |
| Phases x Groupe | Wilk | 0,921615 | 1,0206 | 4 | 98 | 0,400589 |
| Virages x Phase | Wilk | 0,001141 | 54,7216 | 48 | 3 | 0,003407 |
| Virages x Phases x Groupes | Wilk | 0,004189 | 0,9031 | 96 | 6 | 0,636130 |

Tableau 16 : Tests multivariés pour mesures répétées

Nous avons donc procédé à un regroupement de ces deux types de virages (*Rapides vs. Lents*) afin de voir si cet effet est statistiquement significatif. La Figure 33 montre une interaction significative ($F[2,51] = 5.72, p < 0.01$) entre le type de virage (*Rapide vs. Lent*) et le type de véhicule conduit. Les différences de vitesse au point de corde ne se manifestent que pour les virages rapides. Les effets sont résumés dans le Tableau 17 (Test multivariés). Il n'y a **pas d'effet significatif du facteur groupe.**

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|------------------------------|------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Type Virage | Wilk | 0,014138 | 3556,172 | 1 | 51 | 0,000000 |
| Type Virage x Groupe | Wilk | 0,816679 | 5,724 | 2 | 51 | 0,005719 |
| Phase | Wilk | 0,109004 | 204,349 | 2 | 50 | 0,000000 |
| Phase x Groupe | Wilk | 0,927396 | 0,960 | 4 | 100 | 0,432881 |
| Type Virage x Phase | Wilk | 0,225091 | 86,066 | 2 | 50 | 0,000000 |
| Type Virage x Phase x Groupe | Wilk | 0,948676 | 0,667 | 4 | 100 | 0,616139 |

Tableau 17 : Tests multivariés pour mesures répétées

La vitesse au point de corde en virage *rapide* diffère statistiquement (Newman-Keuls) entre les groupes « récent » et « ancien » d'une part, et « récent » et « modifié » d'autre part. La différence entre groupe « ancien » et « modifié » n'est pas significative. Par ailleurs, cette interaction entre type de virage et type de véhicule semble se manifester de manière plus importante (mais non significative) lors des phases de familiarisation et de consolidation (Figure 34).

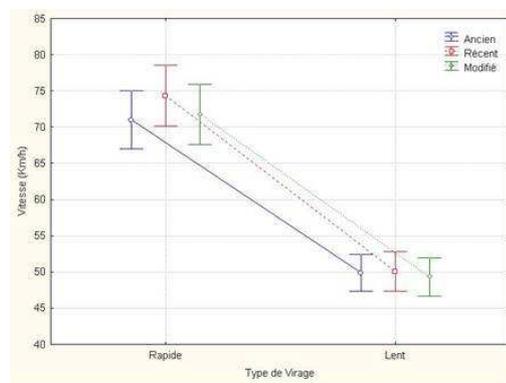


Figure 33 : Vitesse au point de corde en fonction de la géométrie du virage

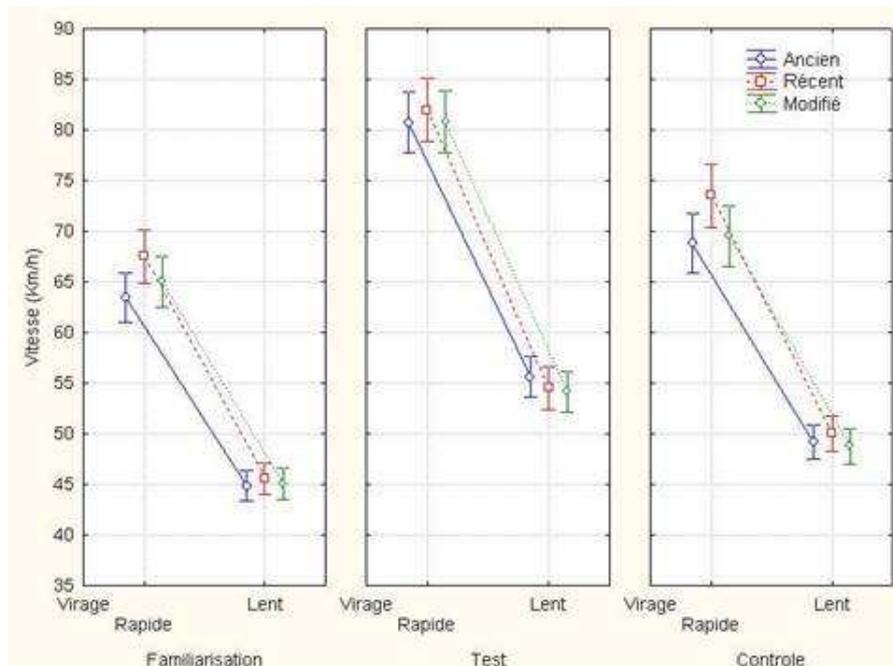


Figure 34 : Vitesse au point de corde

Effet de la phase de test :

La Figure 35 montre l'effet significatif de la phase de test pour les 3 types de véhicules. Le test a posteriori de Newman-Keuls révèle un effet significatif, conforme aux attentes a priori, de toutes les paires de comparaisons (Familiarisation/Test, Test/Consolidation et Familiarisation/Consolidation).

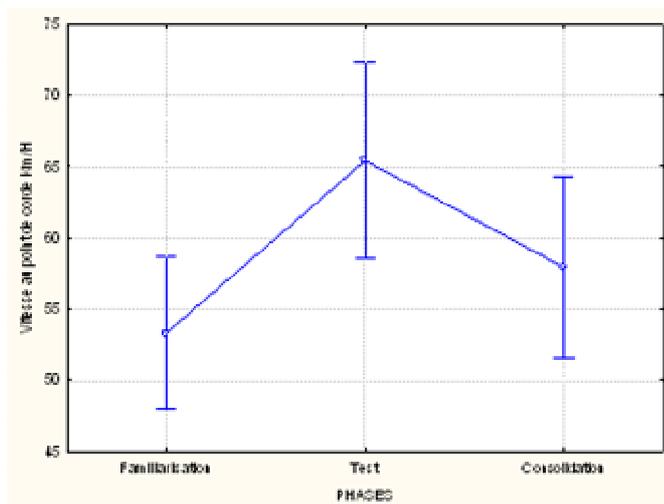


Figure 35 : Vitesse au point de corde en fonction de la phase de conduite

Virages lents

La corrélation partielle entre la phase de consolidation et la phase de familiarisation se manifeste pour chacun des 3 types de véhicules. Cependant, seul le véhicule « modifié » présente une corrélation partielle avec le nombre d'alertes en phase de test, alors que pour les 2 autres véhicules cette corrélation est absente.

Rappelons que ceci signifie que lorsque la vitesse en familiarisation est neutralisée, la corrélation entre le nombre d'alertes en phase de test et la vitesse en phase de consolidation exprime un lien entre ces 2 variables.

| Véhicule | | Corrélation Partielle | Tolérance ⁵ | R ² | t(16) | Niveau p |
|----------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|----------|----------|
| <u>Ancien</u> | Nombre d'alertes | -0,093207 | 0,525814 | 0,47419 | -0,37446 | 0,71297 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,603196 | 0,525814 | 0,47419 | 3,02508 | 0,00804 |
| <u>Récant</u> | Nombre d'alertes | 0,126351 | 0,710823 | 0,28918 | 0,47658 | 0,64101 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,545132 | 0,710823 | 0,28918 | 2,43299 | 0,02897 |
| <u>Modifié</u> | Nombre d'alertes | 0,636797 | 0,918296 | 0,08170 | 3,19871 | 0,00598 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,521282 | 0,918296 | 0,08170 | 2,36578 | 0,03188 |

Tableau 18 : Corrélations partielles pour les 3 groupes

⁵ La tolérance (comprise entre 0 et 1) exprime la redondance de la variable, plus ce coefficient est faible plus la variable est redondante par rapport aux autres variables.

Virages Rapides

Comme pour les virages *lents*, la corrélation partielle entre la vitesse au point de corde en phase de consolidation est significative pour le véhicule modifié seulement. Mais la corrélation entre la vitesse en phase de consolidation et la vitesse en phase de familiarisation n'est plus significative pour ce type de véhicule contrairement aux 2 autres. Ceci peut être interprété par un changement radical du comportement de conduite exprimé par la vitesse au point de corde pour ce groupe de sujets.

| Véhicule | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|----------|----------|
| <u>Ancien</u> | Nombre d'alertes | 0,12391 | 0,87559 | 0,12440 | -0,31815 | 0,75448 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,53689 | 0,87559 | 0,12440 | 2,85673 | 0,01142 |
| <u>Récent</u> | Nombre d'alertes | 0,06937 | 0,78722 | 0,21277 | 0,26019 | 0,79850 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,60272 | 0,78722 | 0,21277 | 2,82616 | 0,01346 |
| <u>Modifié</u> | Nombre d'alertes | 0,57320 | 0,91719 | 0,08280 | 2,70925 | 0,01615 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,37548 | 0,91719 | 0,08280 | 1,56904 | 0,13748 |

Tableau 19 : Corrélations partielles pour les 3 groupes

En plus des corrélations partielles, la modification de la vitesse au point de corde peut être étudiée par une Analyse Factorielle qui consiste en une réduction du nombre initial de facteurs (ici les virages pour chacune des 3 phases) donnant généralement une information redondante. L'analyse factorielle identifie des facteurs orthogonaux entre eux et expliquant au mieux la variance entre les facteurs initiaux. En d'autres termes il s'agit d'identifier des facteurs pouvant mettre en évidence une opposition entre les variables initiales. Il s'agit d'une méthode descriptive pouvant donner des informations précieuses sur la ressemblance ou la dissemblance d'un nombre relativement important de variables. Les facteurs issus de l'analyse sont associés aux « composantes principales », indices donnant la part de variance autour du ou des nouveaux facteurs identifiés ; le « Facteur 1 » expliquant la plus grande part de variance, c'est-à-dire identifiant les plus grandes différences entre les variables initiales, le « Facteur 2 » la deuxième plus grande variance, etc. La nature des nouveaux facteurs issus de l'analyse relève de l'interprétation du chercheur au regard de la répartition des variables initiales dans un graphique de projection sur les axes représentant les facteurs identifiés.

Les 3 graphiques ci-dessous montrent la projection des facteurs « virages » pour les 3 phases de conduite.

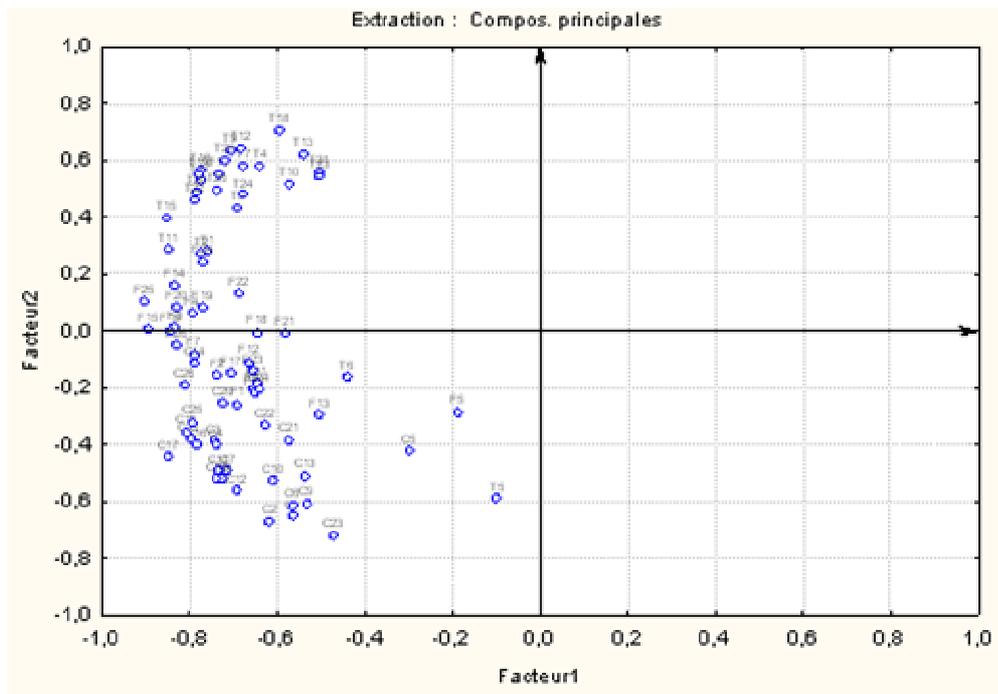


Figure 36 : ACP pour le Groupe véhicule « Ancien »

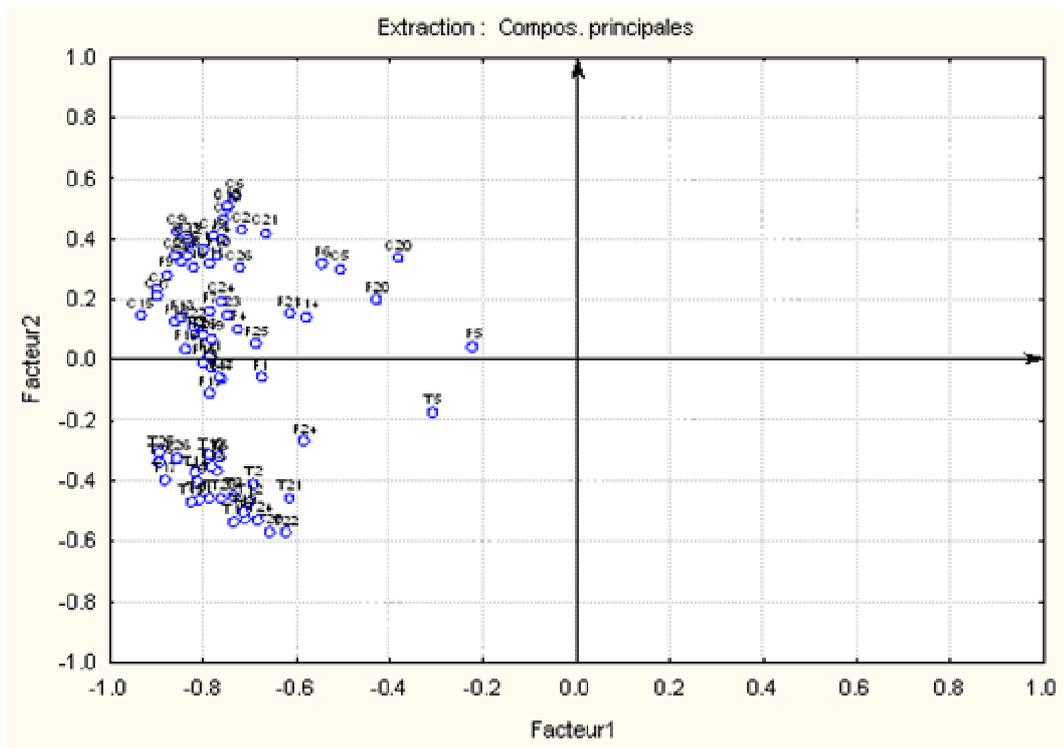


Figure 37 : ACP pour le Groupe véhicule « Récent »

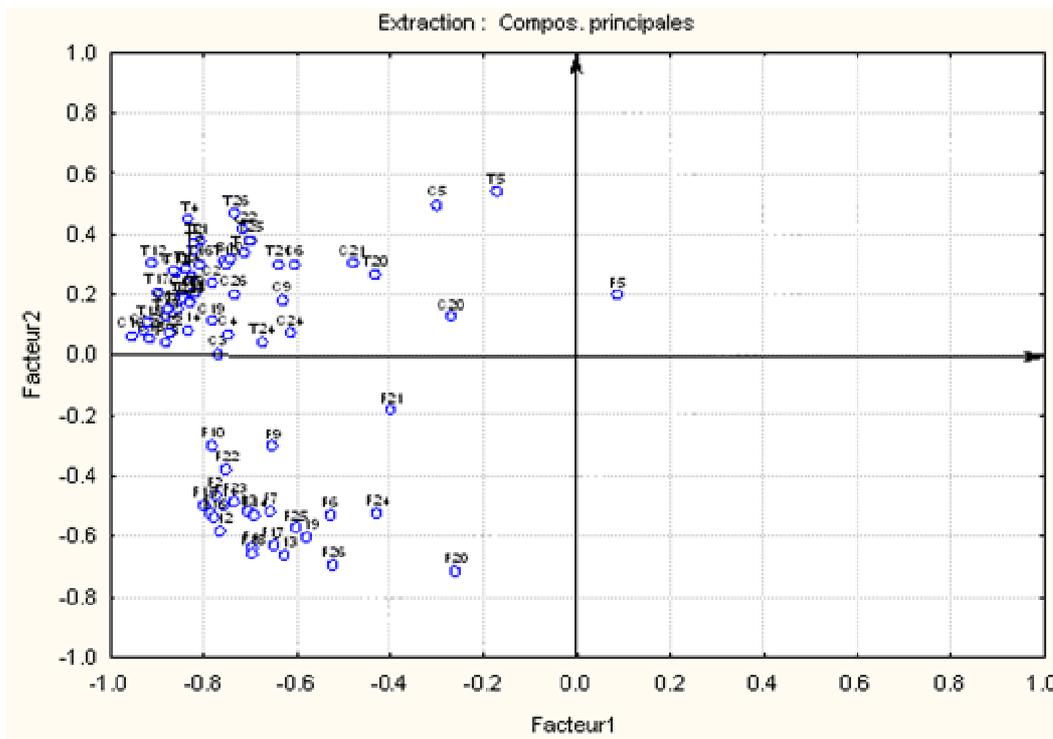


Figure 38 : ACP pour le Groupe véhicule « Modifié »

Axe 1 :

Pour les 3 types de véhicules, le premier facteur (axe vertical) ne montre pas d'opposition entre des groupes de variables virages. Seul le virage 5 pour les 3 phases de test et les 3 véhicules s'approche plus de cet axe que les autres virages. Sur le schéma du circuit il semble que ce virage est une quasi-ligne droite. Vraisemblablement, l'axe 1 caractérise les types de virages montrant une légère différence entre le virage 5 et l'ensemble des autres virages.

Axe 2 :

Le second facteur, expliquant une part de variance moindre par rapport au premier facteur, semble mettre en évidence les différences de conduite entre les 3 phases pour chacun des véhicules.

Pour le *véhicule ancien*, il n'y a pas d'opposition très nette entre les 3 phases, seule la phase de test semble s'opposer légèrement aux phases de familiarisation et de consolidation.

Pour le *véhicule récent*, l'opposition est plus marquée entre la phase de test d'une part et les phases de familiarisation et de consolidation d'autre part. La phase de familiarisation ne se distingue pas de la phase de consolidation, ce qui tend à confirmer une absence de changement de conduite pour le véhicule récent, également mise en évidence par la méthode de corrélation partielle.

Pour le *véhicule modifié*, l'opposition est très importante entre la phase de familiarisation d'une part et les phases de test et de consolidation d'autre part. Cette opposition peut s'interpréter comme une modification de la conduite en phase de consolidation, ressemblant donc plus à la conduite en phase de test, par rapport à la phase de familiarisation.

2.1.2. Accélération Transversale Maximale

Statistiques générales :

Les analyses multivariées de l'*accélération transversale maximale* montre qu'il n'y a pas d'effet significatif du groupe.

Lorsqu'on procède au regroupement des virages *lents* et *rapides*, les résultats montrent que, contrairement à la vitesse au point de corde, l'accélération transversale dans les différents virages varie significativement entre les 3 groupes (Tableau 20). La Figure 39 suggère que les différences entre les groupes sont surtout marquées en phase de test et en phase de consolidation pour les virages lents, mais les comparaisons par paires ne permettent pas d'aller au-delà d'une analyse descriptive.

Toutefois, on remarque que dans la phase de consolidation l'accélération transversale se trouve à un niveau intermédiaire entre la phase de familiarisation et la phase de test, mais seulement pour les virages lents.

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | P |
|-------------------------------------|------|----------|---------|-------|--------|---------|
| Type Virage | Wilk | 0,131650 | 336,390 | 1 | 51 | 0,00000 |
| Type Virage x Groupe | Wilk | 0,994254 | 0,1474 | 2 | 51 | 0,86334 |
| Phase | Wilk | 0,204011 | 97,542 | 2 | 50 | 0,00000 |
| Phase x Groupe | Wilk | 0,934393 | 0,8628 | 4 | 100 | 0,48913 |
| Type Virage x Phase | Wilk | 0,219667 | 88,808 | 2 | 50 | 0,00000 |
| Type Virage x Phase x Groupe | Wilk | 0,829693 | 2,4461 | 4 | 100 | 0,05126 |

Tableau 20 : Tests multivariés pour mesures répétées

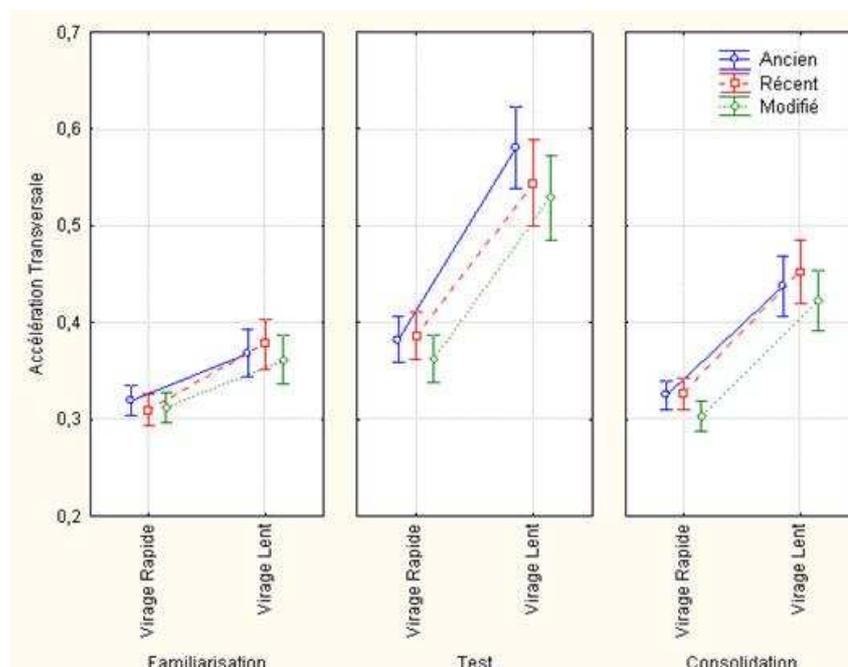


Figure 39 : Accélération Transversale Maximale

Effet de la phase de test :

Comme pour la *vitesse au point de corde*, nous retrouvons des résultats identiques avec les corrélations partielles : une corrélation partielle entre la phase de consolidation et la phase de familiarisation pour chacun des trois types de véhicules. Cependant, seul le *véhicule modifié* présente une corrélation partielle entre le nombre d'alertes en phase de test et l'accélération transversale maximale en phase de consolidation. Ceci montre qu'il existe également une modification de l'accélération latérale, en phase de consolidation, liée au système d'alerte.

Pour les virages rapides, on ne remarque aucune corrélation partielle entre la phase de consolidation et la phase de familiarisation d'une part et le nombre d'alertes d'autre part. L'accélération transversale étant relativement faible dans les virages rapides et évoluant relativement peu d'une phase à l'autre, ce résultat n'est pas surprenant.

L'ACP montre une répartition identique autour des deux facteurs principaux que celle décrite pour la vitesse au point de corde. Toutefois, on observe ici une opposition plus marquée entre les deux catégories de virages de part et d'autre du premier axe, montrant que la différence de conduite est très marquée entre les virages lents et les virages rapides.

Tout comme pour la vitesse au point de corde, pour le véhicule ancien, il n'y a pas d'opposition très nette entre les 3 phases, seule la phase de test semble s'opposer légèrement aux deux autres phases pour l'accélération transversale.

Pour le véhicule récent, l'opposition est plus marquée entre la phase de test d'une part et les deux autres phases d'autre part. La phase de familiarisation ne se distingue pas de la phase de consolidation, ce qui tend à confirmer le manque de changement de conduite pour le véhicule récent.

Pour le véhicule modifié, l'opposition est très importante entre la phase de familiarisation les deux autres phases. Cette opposition peut s'interpréter comme une modification de la conduite en phase de consolidation par rapport à la phase de familiarisation.

2.1.3. Rayon de courbure

Le rayon de courbure en virage donne une information redondante aux informations conjointes de la vitesse au point de corde et de l'accélération transversale. Etant donné que ces deux dernières mesures semblent varier significativement et simultanément, on peut s'attendre à ce que le rayon de courbure ne change pas d'une phase à l'autre et d'un groupe expérimental à l'autre. Les résultats montrent qu'il n'y a ni effet du type de véhicule, ni interaction entre le type de véhicule et la phase de test.

Le rayon de courbure en phase de consolidation est corrélé au rayon de courbure en phase de familiarisation pour les 3 types de véhicules, lorsque le nombre d'alertes est maintenu constant. Toutefois, il est intéressant de noter que, pour le véhicule modifié, la corrélation partielle entre le rayon de courbure en phase de consolidation et le nombre d'alertes en phase de test est négative. Ce qui signifierait que les sujets ayant conduit avec le véhicule modifié, change radicalement leur trajectoire en virages lents durant la phase de consolidation, par rapport à cette même trajectoire en phase de test. Ceci suggère que le système d'alerte a pleinement joué son rôle en phase de test. Cependant, il ne faut pas perdre de vue le poids que représente chacune de ces variables dans la variabilité totale de la

conduite. En effet, les effets sont extrêmement faibles puisque la variance expliquée atteint à peine 3%.

2.1.4. Conclusions sur les indices dans les virages

Dichotomie virages lents / virages rapides

Une première observation est celle qui semble opposer une modification du comportement de conduite entre virages *rapides* et virages *lents* (négociés à plus ou moins de 60 km/h). La modification de la vitesse maximale au point de corde, d'une phase de test à l'autre, est surtout sensible dans les virages rapides. A l'opposé, la modification de l'accélération transversale est surtout sensible dans les virages lents.

Evolution de la conduite après la phase de conduite rapide

Pour les trois mesures recueillies (*vitesse au point de corde*, *accélération transversale maximale* et *rayon de courbure*), on observe un impact significatif de la phase de test sur phase de consolidation. Les sujets ont tendance à adopter une conduite significativement différente de celle de la phase de familiarisation. L'impact de la phase de test est relativement fort pour la vitesse au point de corde, de moindre importance pour l'accélération transversale et quasi négligeable pour le rayon de courbure dont la modification au cours des phases de conduite semble être la conséquence du changement des deux autres paramètres plutôt qu'une modification délibérée de la trajectoire. En effet, la seule modification notable du rayon de courbure, qui est valable pour chacun des 3 groupes, est que sa longueur tend à diminuer lorsque les sujets roulent plus vite, et ceci exclusivement dans les virages *rapides*. Etant donné que le rayon de courbure est d'autant plus grand qu'un sujet coupe le virage, ceci signifierait que les sujets ne coupent pas les virages lorsqu'ils roulent plus vite dans les virages à faible courbure, mais qu'ils subissent la vitesse du véhicule en prenant une trajectoire plus extérieure.

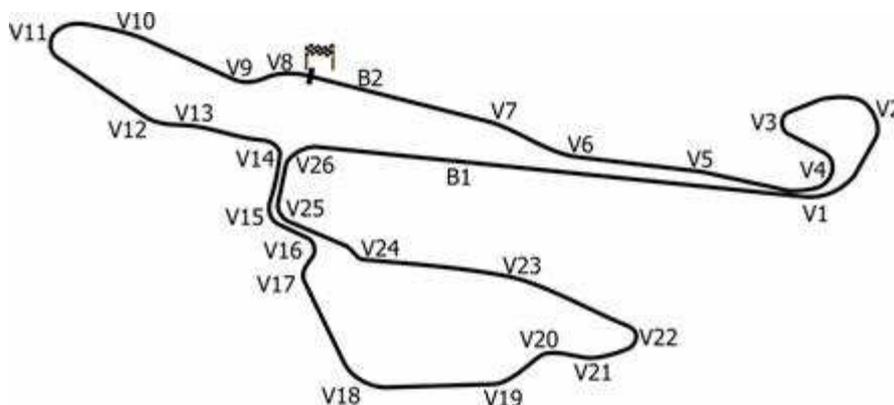
Impact du système d'alerte.

Bien que les comparaisons d'indicateurs centraux, comme la moyenne, ne mettent pas aisément en évidence une différence entre les 3 types de véhicules, les corrélations partielles et l'analyse factorielle ont conjointement permis de montrer un impact du système d'alerte sur le comportement des conducteurs. Ces deux analyses montrent que les sujets ayant conduit sur le véhicule avec système d'alerte, adoptent une vitesse au point de corde (en virage) en phase de consolidation moins augmentée par rapport à la phase de familiarisation que les 2 autres groupes. En d'autres termes, leur vitesse au point de corde sont significativement influencée par les alertes qu'ils ont subies pendant la phase de test.

L'analyse par corrélation partielle a révélé une corrélation négative entre le nombre d'alertes en phase de test et le rayon de courbure en phase de consolidation pour le véhicule muni du système d'alerte. Ce qui suggère que, les sujets auraient tendance à compenser leur plus grande vitesse par un rayon de courbure plus petit pour minimiser la sensation d'accélération transversale, sensation « exagérée » par le système d'alerte. Mais l'importance de la variable rayon de courbure dans la modification du comportement des sujets est très faible comparativement à celle de la vitesse au point de corde et à celle de l'accélération transversale.

2.2. Traitement statistique des indices pour les lignes droites

Trois indices « classique » en dynamique longitudinale ont été ainsi analysés : *Vitesse Maximale*, *Accélération Maximale* et *Accélération Minimale* (ou *décélération maximale*).



- L1 = V9 → V11
- L2 = V11 → V12
- L3 = V13 → V14
- L4 = V14 → V15
- L5 = V17 → V18
- L6 = V18 → V19
- L7 = V22 → V23
- L8 = V23 → V24
- L9 = V24 → V25
- L10 = V25 → V26
- L11 = V26 → B1
- L12 = B1 → V1
- L13 = V1 → V2
- L14 = V4 → V6
- L15 = V7 → V8
- L16 = V4 → V8
- L17 = V22 → V25

2.2.1. Vitesse maximale

Le Tableau 21 donne les effets des différentes variables (Groupe, Virages et Phase de test). On note une tendance significative pour la différence entre les 3 groupes de sujets, avec une vitesse maximale plus élevée pour le véhicule « récent » que pour les 2 autres véhicules.

Il est surprenant de constater que le véhicule « Modifié » n'atteint pas une vitesse maximale identique à celle du véhicule « Récent » en phase de familiarisation, mais reste au niveau de la vitesse maximale du véhicule « Ancien ».

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|---|------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Groupe | | | 2,51 | 2 | 51 | 0,084 |
| Lignes droites | Wilk | 0,007362 | 303,3895 | 16 | 36 | 0,000000 |
| Lignes droites x Groupe | Wilk | 0,407426 | 1,2750 | 32 | 72 | 0,196322 |
| Phases | Wilk | 0,119583 | 184,0606 | 2 | 50 | 0,000000 |
| Phases x Groupe | Wilk | 0,909344 | 1,2166 | 4 | 100 | 0,308582 |
| Lignes droites x Phase | Wilk | 0,031919 | 18,9560 | 32 | 20 | 0,000000 |
| Lignes droites x Phases x Groupe | Wilk | 0,053588 | 2,0749 | 64 | 40 | 0,007480 |

Tableau 21 : Tests multivariés pour mesures répétées

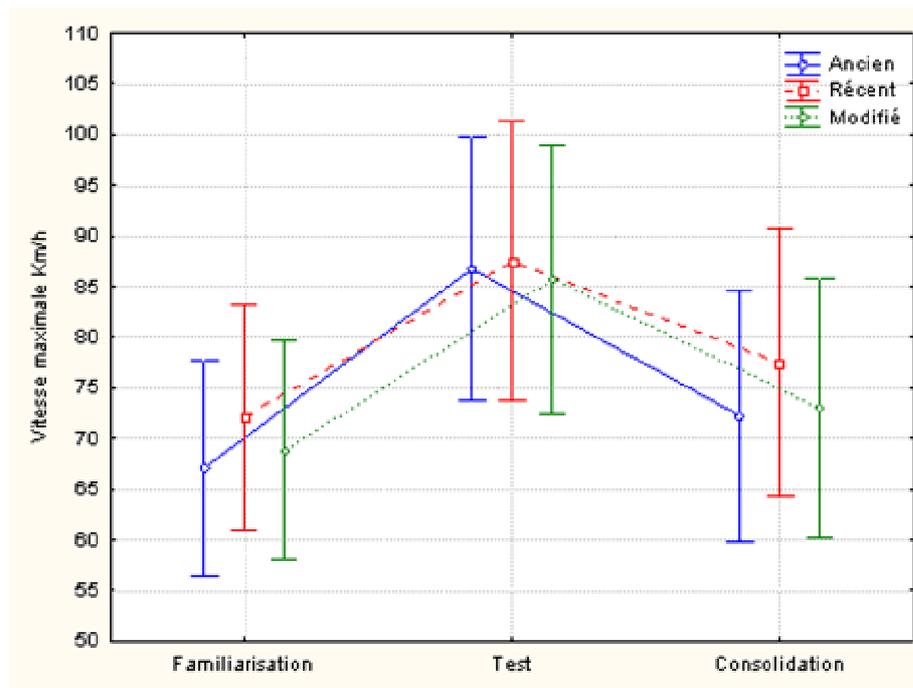


Figure 40 : Vitesse maximale en ligne droite

L'analyse montre également une interaction d'ordre 2 entre les 3 facteurs : la modification de la vitesse d'une phase à l'autre ne s'opère pas de la même manière pour les différents virages d'un groupe à l'autre. En effet, il semblerait que pour la position intermédiaire en phase de familiarisation du véhicule « modifié » entre le véhicule « ancien » et le véhicule « modifié » s'observe essentiellement dans les grandes lignes droites (L11, L12, L14, L15, L16, L17). C'est également pour ces grandes lignes droites que l'on observe une diminution de la vitesse maximale pour le véhicule « modifié » en phase de consolidation, atteignant le niveau du véhicule « ancien ». Pour les autres lignes droites, il ne semble pas y avoir de différence de *vitesse maximale* entre les véhicules « ancien » et « modifié » en familiarisation.

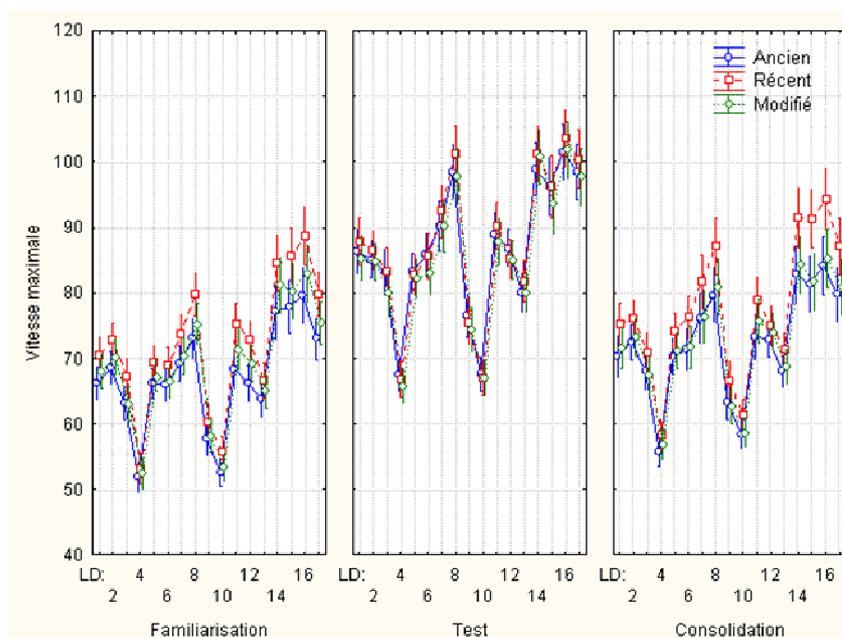


Figure 41 : Vitesse maximale en ligne droite

L'interaction entre le type de lignes droites et le type de véhicule est significative, montrant simplement que les différences entre les 3 types de véhicules sont plus importantes dans les lignes droites longues que dans les lignes droites courtes.

Les analyses statistiques montrent une très légère tendance de la double interaction phase x type de lignes de droites x groupes. Il nous semble donc inutile d'investiguer plus avant la différence de conduite entre les trois groupes sur la base de cette variable.

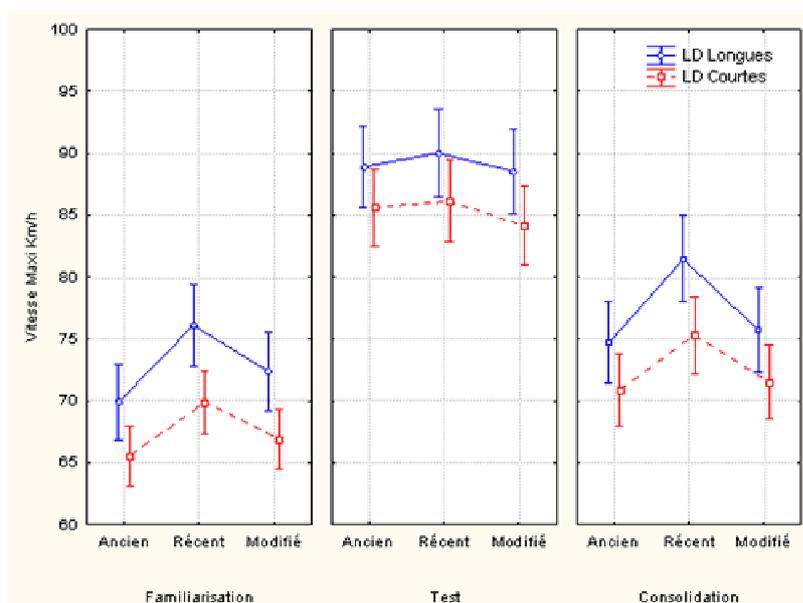


Figure 42 : Vitesse maximale en ligne droite

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|--|------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Groupe | | | 2,8 | 2 | 51 | 0,071 |
| Type Lignes droites | Wilk | 0,139554 | 314,4490 | 1 | 51 | 0,000000 |
| Type Lignes droites x Groupe | Wilk | 0,889089 | 3,1811 | 2 | 51 | 0,049900 |
| Phases | Wilk | 0,127124 | 171,6577 | 2 | 50 | 0,000000 |
| Phases x Groupe | Wilk | 0,903077 | 1,3074 | 4 | 100 | 0,272460 |
| Type Lignes droites x Phase | Wilk | 0,749830 | 8,3409 | 2 | 50 | 0,000748 |
| Type Lignes droites x Phases x Groupe | Wilk | 0,853501 | 2,0606 | 4 | 100 | 0,091625 |

Tableau 22 : Tests multivariés pour mesures répétées

Effet de la phase de test :

L'impact du système d'alerte sur la vitesse maximale en ligne droite durant la phase de consolidation, est relativement important puisqu'il n'y a pas de corrélation partielle entre la phase de familiarisation et la phase de consolidation pour le véhicule modifié. Par contre, pour les deux autres véhicules, cette corrélation est significative. Ceci signifie que la vitesse maximale adoptée en phase de consolidation pour ces deux groupes est liée à leur vitesse en phase de familiarisation dans les différentes lignes droites.

Pour le groupe ayant conduit sur le véhicule modifié, la vitesse maximale adoptée en phase de consolidation, n'est plus liée à leur vitesse maximale initiale en phase de familiarisation mais au nombre d'alertes déclenchées en phase de test.

| Véhicules | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|----------------|------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ancien | Nombre d'alertes | -0,15639 | 0,884854 | 0,11514 | -0,63335 | 0,53545 |
| | LD en Familiarisation | 0,56382 | 0,884854 | 0,11514 | 2,73072 | 0,01480 |
| Récent | Nombre d'alertes | 0,04183 | 0,805995 | 0,19400 | 0,15666 | 0,87774 |
| | LD en Familiarisation | 0,70373 | 0,805995 | 0,19400 | 3,70620 | 0,00234 |
| Modifié | Nombre d'alertes | 0,57731 | 0,950404 | 0,04959 | 2,73833 | 0,01524 |
| | LD en Familiarisation | 0,36605 | 0,950404 | 0,04959 | 1,52345 | 0,14844 |

Tableau 23 : Corrélations partielles

2.2.2. Accélération maximale

L'accélération maximale est globalement plus importante pour les groupes ayant conduit les véhicules *récent* et *modifié*. Ces deux groupes ne diffèrent pas significativement entre eux. Les différences d'accélération sont surtout manifestes en phase de familiarisation et en phase de consolidation, et moins importantes en phase de test. Il est fort probable que les accélérations moins élevées du premier groupe soient liées aux caractéristiques des véhicules et non à une volonté des sujets de moins solliciter le véhicule en phase de test.

Les corrélations entre la vitesse au point de corde (en virage) et l'accélération maximale en ligne droite ne sont ni négatives ni significatives, ce qui signifierait que l'accélération en lignes droites ne soit pas en relation inverse avec la vitesse en virage comme nous aurions pu le supposer : les sujets accélèreraient d'autant plus en sortie de virage pour rattraper leur retard, qu'ils ont conduit doucement dans le virage.

Effet de la phase de test :

Les corrélations partielles montrent que les trois véhicules présentent les mêmes résultats, à savoir une corrélation partielle entre l'accélération en phase de consolidation et en phase de familiarisation lorsque la variance liée aux alertes est écartée. Le véhicule modifié ne montre pas de corrélation partielle entre l'accélération en phase de consolidation et le nombre d'alertes, lorsque la variance liée à l'accélération en phase de familiarisation est écartée, ce qui signifierait que le système d'alerte n'ait pas d'impact sur le conducteur en termes d'accélération.

2.2.3. Accélération minimale (ou décélération maximale)

La décélération est globalement plus forte pour le véhicule récent que pour les deux autres véhicules qui ne diffèrent pas entre eux (effet significatif). Les différences entre ces trois groupes ne changent pas en fonction de la phase de test (interaction non significative).

L'examen des corrélations partielles ainsi que l'absence d'interaction entre la phase de test et le type de véhicule semblent marquer une absence d'impact du système d'alerte sur la décélération maximale en lignes droites. Cependant, l'analyse factorielle semble montrer une répartition différente des lignes droites liées de part et d'autre du second facteur (axe) selon le type de véhicule : a) pour le *véhicule ancien* et le véhicule récent, les lignes droites en phase de familiarisation et en phase de consolidation semblent s'opposer aux lignes droites en phase

de test, b) pour le *véhicule modifié* l'opposition semble plutôt se faire dans le sens test - consolidation vs. familiarisation. Cette distinction, bien que moins nette que pour la vitesse maximale en virage et en ligne droite, n'est pas surprenante puisque la décélération maximale semble être fortement corrélée à la vitesse maximale en ligne droite et en virage, et elle n'est probablement qu'une conséquence de la vitesse maximale et non une stratégie de conduite des sujets qui consisterait à freiner en dernière limite en entrée de virage.

2.2.4. Conclusions sur les indices dans les lignes droites

L'analyse des indices en lignes droites semble révéler une modification de la conduite similaire à celle observée dans les virages. En effet, les indices d'accélération et de décélérations expliquent une part de variance restreinte par rapport à la vitesse maximale et semblent beaucoup moins sujets à modification en fonction de la phase de conduite et du type de véhicule conduit. Tout porte à croire, que la vitesse maximale est l'indice déterminant dans les modifications de conduite liées aux conditions expérimentales et que la variation des autres indices ne serait qu'une conséquence de la variation de la vitesse maximale.

Bien que pour l'ensemble des 3 groupes de sujets, la vitesse maximale en lignes droites semble augmenter significativement en phase de consolidation par rapport à la phase de familiarisation, les sujets ayant conduit le véhicule modifié semblent significativement modifier leur vitesse maximale en phase de consolidation selon le nombre d'alertes qu'ils ont subi en phase de test.

En phase de consolidation, les variables *accélération et décélération maximales* semblent également être fonction du nombre d'alertes déclenchées en phase de test, mais l'impact du système d'alerte sur ces indices est moindre. Il est fort probable que le lien entre le système d'alerte et l'accélération ou la décélération soit indirect. En effet, ces deux indices sont en lien direct avec la vitesse maximale, elle-même est en lien direct avec le système d'alerte.

2.3. Discussion Générale

2.3.1. Véhicule Récent vs. Véhicule Récent avec Système d'Alerte

Biais expérimental : Il a été noté que pour les vitesses moyennes globales et pour les vitesses moyennes par zone du circuit, les sujets ayant conduit avec le système d'alerte présentent des vitesses moyennes inférieures à celles des sujets ayant conduit le même véhicule sans le système d'alerte, et ceci dès la phase de familiarisation. Ce résultat est tout à fait inattendu puisqu'il s'agissait du même véhicule avec un système d'alerte embarqué qui était fonctionnel pour un groupe mais inactif pour l'autre groupe. Toutefois, seule la vitesse dans différentes zones du circuit (virages et lignes droites) semble effectivement différer entre ces deux groupes alors que d'autres paramètres, telle que l'accélération ou la décélération sont globalement similaires.

La répartition des sujets dans les deux groupes n'est probablement pas tout à fait homogène.

2.3.2. Modification de la conduite entre la phase de test et la phase de consolidation

Contrairement aux vitesses moyennes sur l'ensemble des tours, les différents indices de conduite relevés dans les virages et les lignes droites, varient significativement entre la phase de familiarisation et la phase de consolidation. La vitesse au point de corde dans les virages et la vitesse maximale en lignes droites, sont significativement plus importantes en phase de consolidation qu'en phase de familiarisation. Ayant pu montrer avec les vitesses moyennes que cette augmentation ne traduit pas un effet d'apprentissage, ces conclusions peuvent se généraliser aux indices analysés ici. La phase de test a donc eu un impact sur la conduite des sujets lors de la phase de consolidation. Cependant, les données ne permettent pas de mettre en évidence un impact plus ou moins important selon le type de véhicule conduit.

2.3.3. Profil de conduite

L'analyse des indices détaillés pour les virages et les lignes droites a permis de mettre en évidence les stratégies adoptées par les sujets pour réduire leur temps de conduite suite à la consigne de l'expérimentateur ou suite à une modification de sa propre conduite en phase de consolidation. Il semblerait que l'ensemble des conducteurs ne font qu'augmenter leur vitesse dans les zones où le circuit le permet sans adapter leur trajectoire ou la gestion des entrées et sorties de virages. En effet, l'accélération transversale est surtout plus importante dans les virages « larges » montrant que les sujets subissent leur vitesse. Le rayon de courbure diminue également dans les virages « serrés » montrant que la trajectoire dans ces virages est plus externe en phase de test et en phase de consolidation, ce qui témoigne une fois de plus d'une trajectoire « subie » et non « choisie ». De plus le rayon de courbure n'augmente pas dans les virages les plus serrés lorsque la vitesse est augmentée, ce qui montre également que les sujets ne coupent pas les virages lorsqu'ils augmentent leur vitesse.

2.3.4. Impact du système d'alerte

Deux types d'analyses nous ont permis de montrer que le système d'alerte semble avoir joué pleinement son rôle :

la corrélation partielle pour les différents indices entre la phase de familiarisation, la phase de consolidation et le nombre d'alertes déclenchées en phase de test ;

l'analyse factorielle a permis de montrer que la variance liée aux phases de conduite (familiarisation, test, consolidation) se répartie de différente manière selon le type de véhicule. En effet, pour le véhicule modifié on observe une opposition nette entre les virages et les lignes droites en phase de familiarisation d'une part, et en phase de consolidation et de test d'autre part. Ceci ne signifie pas que la conduite en phase de consolidation ressemble à la conduite adoptée en phase de test pour ce groupe de sujets, mais qu'il existe une variable explicative, orthogonale à toute autre variable, qui oppose la conduite en phase de familiarisation à celle en phase de test et en phase de consolidation. Rappelons enfin, que pour l'ensemble des indices, excepté pour le rayon de courbure, l'analyse factorielle a mis en évidence une certaine opposition entre les variables, mais qu'on ne peut pas conclure pour autant que le lien entre le système d'alerte en phase de test et la modification de ces indices soit direct. Notre interprétation penche plus en faveur d'un lien direct entre le système d'alerte et la vitesse adoptée en lignes droites et en virages, vitesse qui serait à l'origine de la modification des autres paramètres de conduite.

Remarques

Les conclusions auxquelles nous arrivons sur l'existence d'un effet du système d'alerte ont été tirées de l'interprétation de l'ensemble des analyses et non pas d'une simple corrélation, aussi bien sur les indices macroscopiques (par tour du parcours) que les indices microscopiques (par segment, virage ou ligne droite).

Les méthodes statistiques, telles que la régression linéaire ou l'ANOVA (qui est un cas particulier de Régression Linéaire) ne permettent pas de conclure à un lien de cause à effet.

3. RESULTATS SUBJECTIFS

A l'issue de chaque essai de conduite, le sujet est interviewé par un psychologue afin de caractériser son profil (ou style) de conduite, ainsi que sa perception du véhicule et de ses performances. Les résultats de ces entretiens révèlent que :

- un tiers des sujets du groupe avec alertes (G3), a perçu « quelque chose » liée à la direction du véhicule ;
- seulement un sujet sur 19 a perçu (positivement) « quelque chose » dans son siège ;
- Seulement 1 sujet sur 19 déclare avoir perdu confiance dans le véhicule.

De plus, des démonstrations post-expérimentales des alertes au personnel interne (malgré le biais évident) ont permis de mettre en évidence certains aspects positifs et encourageants de cette nouvelle voie de recherche : sensation de légère et brève « perte » de maîtrise, attribuée à des chutes d'adhérence ou à des irrégularités du revêtement...

3.1. Analyse du Questionnaire à l'issue de la conduite en Phase de test

Les réponses des sujets ont été collectées lors d'un entretien « ouvert ». L'objectif premier étant de ne pas biaiser les réponses spontanées du sujet ni d'orienter ses réflexions par rapport aux modifications apportées au véhicule (pour le G3). La fiabilité et la cohérence du questionnaire n'ont pas pu être testées. Pour évaluer la cohérence des réponses, il est d'usage de calculer le degrés d'association entre les réponses aux questions qui présentent une certaine redondance (e.g., « Sensations avec la voiture ? » vs. « Gênes liées à la voiture »). Le nombre de valeurs manquantes (non réponses aux questions) est tel que trop peu de sujets ont répondu à deux ou plus de questions pouvant faire l'objet d'un test de cohérence (Annexe 5, page 92).

3.1.1. Sensations générales

La plupart des sujets affirment s'être bien senti. La répartition des réponses est globalement la même pour les 3 groupes. Par ailleurs, les scores ne sont corrélés ni avec la vitesse moyenne en ligne droite ni avec la vitesse moyenne en virages. Les réponses sont très diverses et ne permettent pas de dégager sur le plan descriptif une sensation globale commune à une majorité de sujets. Une grande partie semble relier la question à leurs performances de conduite.

| | Mal | Moyen | Bien | Très bien | VM (valeurs manquantes) | Totaux |
|----------------|-----|-------|------|-----------|-------------------------|--------|
| Ancien | 0 | 1 | 10 | 2 | 4 | 17 |
| Récent | 1 | 1 | 9 | 2 | 3 | 16 |
| Modifié | 0 | 2 | 6 | 3 | 7 | 18 |
| Total | 1 | 4 | 25 | 7 | 14 | 51 |

Question. Comment vous êtes vous senti ?

Une seule personne a déclaré avoir préféré la première phase de conduite. La grande majorité des personnes ayant déclaré préférer la seconde phase ont essentiellement évoqué le côté ludique de la seconde phase en comparaison à la monotonie ressentie en phase 1.

| | Phase 1 | Phase 2 | VM | Totaux |
|----------------|---------|---------|----|--------|
| Ancien | 0 | 11 | 6 | 17 |
| Récent | 1 | 7 | 8 | 16 |
| Modifié | 0 | 8 | 10 | 18 |
| Total | 1 | 26 | 24 | 51 |

Question. Préférence phase 1 ou phase 2 ?

Deux types de gênes ont été rapportés par les sujets : les gênes liées au véhicule et les gênes liées au circuit ou à l'environnement. Les réponses liées à la gêne occasionnée par le véhicule sont trop peu nombreuses pour faire l'objet d'une analyse quantitative (39 non réponses à la question sur 51 sujets). Il en est de même pour la gêne occasionnée par le circuit ou l'environnement (présence de personnes, obstacle ou véhicules sur le bord de la piste, mauvaise visibilité...).

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 0 | 4 | 13 | 17 |
| Récent | 1 | 6 | 9 | 16 |
| Modifié | 0 | 1 | 17 | 18 |
| Total | 1 | 11 | 39 | 51 |

Question. Gêne liée au véhicule ?

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 0 | 8 | 9 | 17 |
| Récent | 2 | 7 | 7 | 16 |
| Modifié | 2 | 6 | 10 | 18 |
| Total | 4 | 21 | 26 | 51 |

Question. Gêne liée au circuit ?

3.1.2. Performance de conduite en phase de test

Le nombre de personnes pensant pouvoir augmenter leur vitesse est le même pour les 3 groupes de sujets. Sur le plan descriptif des réponses on note que la plupart des personnes pensant pouvoir améliorer leur vitesse, pensent pouvoir le faire au prix d'une grande prise de risque. Seulement une personne a estimé qu'il ne lui serait pas possible d'améliorer le temps. Notons que la majorité des personnes ayant estimé pouvoir améliorer leur temps en roulant plus vite ont estimé l'amélioration possible à quelques secondes.

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 3 | 13 | 1 | 17 |
| Récent | 1 | 13 | 2 | 16 |
| Modifié | 0 | 14 | 4 | 18 |
| Total | 4 | 40 | 7 | 51 |

Question. Auriez-vous pu conduire plus vite ?

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 0 | 12 | 5 | 17 |
| Récent | 1 | 3 | 12 | 16 |
| Modifié | 0 | 11 | 7 | 18 |
| Total | 1 | 26 | 24 | 51 |

Question. Possibilité d'améliorer le temps en roulant plus vite ?

Le nombre de personnes déclarant avoir atteint (ou non) les limites du véhicule est globalement le même pour chaque groupe. La plupart des sujets déclarant n'avoir pas poussé la voiture jusqu'à ses limites, ne l'a pas fait par souci de sécurité mais pense que les performances de la voiture auraient pu leur permettre d'aller plus vite. Le nombre de personnes déclarant avoir atteint (ou non) leur propres limites est globalement le même pour chaque groupe.

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 3 | 5 | 9 | 17 |
| Récent | 4 | 5 | 7 | 16 |
| Modifié | 6 | 3 | 9 | 18 |
| Total | 13 | 13 | 25 | 51 |

Question. Limites du véhicule atteintes ?

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 3 | 2 | 12 | 17 |
| Récent | 3 | 4 | 9 | 16 |
| Modifié | 5 | 2 | 11 | 18 |
| Total | 11 | 8 | 32 | 51 |

Question. Limites de soi ?

La répartition des personnes ayant exprimé une sensation de danger (ou non) ne diffère pas significativement d'un groupe à l'autre.

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----|-----|----|--------|
| Ancien | 2 | 5 | 10 | 17 |
| Récent | 5 | 3 | 8 | 16 |
| Modifié | 4 | 1 | 13 | 18 |
| Total | 11 | 9 | 31 | 51 |

Question. Sensation de danger ?

Seulement 2 sujets ont estimé la tâche de conduite rapide fatigante. Il s'agit du sujet 71 et du sujet 73. Ce dernier était le sujet le plus rapide et qui avait été éliminé des analyses précédentes.

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----------|----------|----|--------|
| Ancien | 5 | 0 | 12 | 17 |
| Récent | 10 | 1 | 5 | 16 |
| Modifié | 10 | 1 | 7 | 18 |
| Total | 25 | 2 | 24 | 51 |

Question. La tâche était-elle difficile, fatigante ?

La répartition des sujets affirmant ne pas avoir une conduite similaire avec leur propre véhicule diffère significativement d'un groupe à l'autre : $\chi^2 = 6.55$, $p = 0.03$. Il semblerait que la différence soit essentiellement due aux sujets ayant conduit avec la « Mégane II avec alertes ». L'explication est relativement difficile puisqu'il semble que pour la majorité des sujets ayant répondu non, la raison est essentiellement liée au respect du véhicule et à la crainte de le détériorer. Plusieurs personnes, surtout dans le groupe du véhicule « avec alertes » ont répondu que leur propre véhicule ne présentait pas des performances suffisantes pour conduire comme ils l'avaient fait en phase de test. Il n'est donc pas à exclure que cet effet soit lié à un biais de recrutement, à savoir une répartition non contrôlée sur la base du véhicule habituellement conduit par le sujet. Ceci pourrait également expliquer pourquoi les sujets de ce groupe ont conduit moins vite que les sujets du groupe « Mégane II sans alertes ».

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----------|----------|----|--------|
| Ancien | 6 | 6 | 5 | 17 |
| Récent | 3 | 7 | 6 | 16 |
| Modifié | 10 | 2 | 6 | 18 |
| Total | 19 | 15 | 17 | 51 |

Question. Avez-vous déjà sollicité votre propre véhicule de cette manière ?

3.1.3. Perception du système d'alerte

Dans les réponses données, on s'aperçoit que 6 sujets sur les 18 qui ont conduit le véhicule avec alertes ont remarqué un comportement non commun de la voiture, essentiellement dans les virages. Cinq sujets sur les 6 rapportent un problème dans la direction, le terme majoritairement utilisé étant « *flottement dans la direction* ». Un sujet sur les 6 affirme avoir remarqué le flottement dans la direction en phase de familiarisation mais pas en phase de test. Un seul sujet s'est aperçu que les sièges se dégonflaient en virages.

L'analyse montre que les sujets qui ont noté un problème sur la voiture conduisent significativement plus vite en virages que les sujets qui ne semblent pas s'être aperçu d'un « problème » avec la voiture. Le graphique ci-dessous montrent que cette différence n'est significative qu'en phase de test, ce qui est attesté par une interaction significative entre type de conducteur (s'étant aperçu ou non d'un problème) et la phase de conduite, $F[2,30] = 4.14$, $p = 0.02$. On observe une tendance identique pour les lignes droites mais l'interaction ne montre qu'une tendance significative, $F[2,30] = 2.71$, $p = 0.08$.

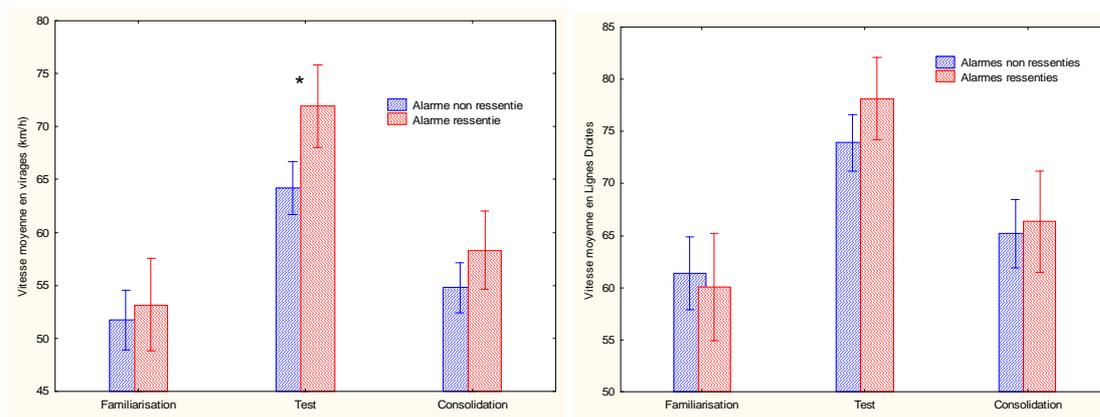


Figure 43 : Vitesse moyenne, en virage (à gauche) et en ligne droite (à droite), selon la phase de conduite pour le véhicule « modifié »

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la différence entre les deux sous-groupes de sujets :

- Le système d'alerte a un impact plus important sur les sujets lorsque son effet n'est pas perçu consciemment par les conducteurs ;
- Les sujets qui se sont aperçus du « problème » sont des conducteurs plus rapides, plus « sportifs » et sont plus sensibles aux réactions du véhicule ;
- Les sujets qui se sont aperçus du « problème de flottement » dans la direction ont conduit plus rapidement et, par conséquent, ont déclenché le système d'alerte un plus grand nombre de fois. En conséquence, la probabilité qu'ils se soient aperçus du problème est plus grande que chez les conducteurs qui ont déclenché le système d'alerte moins fréquemment.

3.2. Analyse du Questionnaire à l'issue de la conduite en Phase de consolidation

A la suite de la phase de test, seulement 2 personnes affirment s'être rendues compte d'avoir conduit un peu plus vite qu'à l'accoutumée avec leurs véhicules personnels puis avoir réduit leur vitesse.

| | Non | Oui | VM | Totaux |
|----------------|-----------|----------|----|--------|
| Ancien | 8 | 2 | 7 | 17 |
| Récent | 11 | 0 | 5 | 16 |
| Modifié | 11 | 0 | 7 | 18 |
| Total | 30 | 2 | 19 | 51 |

Question. Conduite sur véhicule personnel affectée à l'issue de la phase de test ?

Concernant la « préférence » du type de géométrie de route, les sujets ayant conduit la Mégane II sont plus partagés entre lignes droites et virages alors que ceux qui ont conduit la Mégane I semblent préférer majoritairement les virages. Cette différence est significative : $\chi^2 = 11.68$, $p = 0.069$. Cependant, la préférence virages - lignes droites n'est pas corrélée avec la vitesse en lignes droites ou en virages.

| | Virages (0) | Lignes Droites (1) | VM | Totaux |
|---------|-------------|--------------------|----|--------|
| Ancien | 7 | 2 | 8 | 17 |
| Récent | 5 | 6 | 5 | 16 |
| Modifié | 4 | 6 | 8 | 18 |
| Total | 16 | 14 | 21 | 51 |

Question 7 : Préférence Lignes droites ou Virages ?

3.3. Conclusion

Le protocole expérimental a été monté de manière à éviter tout risque susceptible d'orienter l'attention du sujet sur les seuls aspects liés au contrôle dynamique et à la tenue de route. Cette précaution a nécessité notamment un entretien ouvert avec les participants, en particulier à la suite des phases de familiarisation et de test. Ce choix est à l'origine d'un manque assez important de données subjectives, ce qui expliquerait le nombre relativement faible de corrélation entre variables subjectives et variables objectives. Etant donné le très grand nombre de valeurs manquantes (non réponse aux questions), il était difficile d'établir des profils (ou typologies) de conducteurs. Néanmoins, deux résultats présentant une significativité statistique, ont permis d'apporter des éléments de réponses aux questions suscitées par les analyses quantitatives.

A la question « *Auriez-vous conduit de manière identique avec votre propre véhicule ?* », le nombre de personnes ayant répondu par la négative était significativement plus grand dans le groupe « avec alertes » que dans les deux autres groupes. L'examen des réponses révèle que la raison majeure est que plus de personnes de ce groupe possèdent un véhicule moins performant que la Mégane II que dans les deux autres groupes. Ceci pourrait expliquer pourquoi les sujets du groupe « Mégane II avec alertes » ont globalement conduit moins vite que les sujets du groupe « Mégane II sans alertes » alors qu'il s'agissait du même véhicule. Les personnes conduisant au quotidien sur un véhicule « moins performant » auraient une conduite adaptée à ce véhicule et conduiraient de manière similaire sur tout autre véhicule, du moins avant l'adaptation aux performances du nouveau véhicule.

Le second résultat intéressant qui ouvre de grandes perspectives de recherche sur ce même sujet est le caractère perceptible ou non du système d'alertes qui pourrait avoir un impact différent sur les sujets selon qu'il est perçu consciemment ou non. En effet, nous avons remarqué que les sujets ($n = 6 / 19$) qui se sont rendus compte d'un problème de flottement dans la direction et du dégonflage du siège conducteur ($n = 1$) ont conduit significativement plus vite que les sujets qui ne semblent pas s'en être rendus compte. Il faut rester prudent dans l'interprétation par une plus grande influence du système d'alertes lorsqu'il agit de manière inconsciente car d'autres mécanismes peuvent expliquer ce phénomène : *a*) les sujets qui ont la conduite la plus sportive peuvent également être plus sensibles aux réactions du véhicule, *b*) les sujets qui ont conduit plus vite ont déclenché le système d'alertes un plus grand nombre de fois, augmentant ainsi la probabilité de s'apercevoir d'un « problème » et *c*) en raison de la nature du questionnaire, nous ne pouvons être totalement certains que d'autres sujets ne se soient pas rendus compte du problème mais ne l'ont pas exprimé.

CONCLUSION

Hypothèse 1 :

En dehors de toute consigne particulière, les vitesses pratiquées par les conducteurs du véhicule récent sont plus élevées que celles pratiquées par les conducteurs sur le véhicule ancien.

En phase de familiarisation, on observe une tendance non significative des sujets à plus solliciter le véhicule récent (vitesse > 2 à 3 km/h par rapport au véhicule ancien). L'écart s'écrase en phase de test et la différence réapparaît en phase de consolidation entre le véhicule ancien et le véhicule récent. Cela suggère que la différence de vitesse n'est pas due uniquement aux capacités dynamiques supérieures du véhicule récent, mais probablement aussi à des adaptations comportementales en termes de gestion du risque.

Hypothèse 2 :

Avec une consigne induisant une contrainte de temps, les conducteurs vont augmenter leur vitesse quel que soit le véhicule considéré (ancien et récent). Cependant cette augmentation de la vitesse sera plus importante pour la voiture récente comparativement à l'ancienne.

De plus, les conducteurs du véhicule récent avec le système d'alerte présenteront une vitesse moyenne inférieure à celle du véhicule récent sans système d'alerte, elle restera plus importante que celle pratiquée par les conducteurs dans la voiture ancienne.

On n'observe aucun effet du type de véhicule lorsque le contrat de performance est élevé. Les alertes naturelles n'incitent donc pas immédiatement les conducteurs à « lever le pied ». Deux explications non exclusives peuvent être avancées :

1. Le marquage des alertes en termes de risque ressenti demande un temps d'assimilation pour s'inscrire dans les routines ;

2. Le contrat de performance élevée que se fixe le conducteur au niveau symbolique prendrait le dessus sur l'action des alertes au niveau sub symbolique. Autrement dit, parce que le conducteur se fixe des objectifs élevés, il négligerait de prendre en compte les signaux d'alertes retournés par son véhicule. Si ces signaux avaient été plus violents, les comportements de conduite seraient probablement différents, mais il n'était pas question ici de faire peur au conducteur, ni de lui faire perdre sa confiance dans son véhicule et surtout, l'intérêt de cette alerte est qu'elle devait rester imperceptible par le conducteur..

Hypothèse 3 :

Sans consigne particulière, les vitesses pratiquées quel que soit le véhicule, vont diminuer par rapport à la phase de test dans laquelle les conducteurs avaient une contrainte de temps. La vitesse pratiquée par les conducteurs du véhicule récent avec le système d'alerte sera comparable à celle pratiquée par les conducteurs sur un véhicule ancien. C'est-à-dire que l'expérience de l'alerte aura eu pour conséquence de ramener la vitesse pratiquée dans un véhicule récent à celle pratiquée dans un véhicule ancien.

Pour tester cette hypothèse (la plus importante), nous avons employé la méthode de corrélation partielle ainsi que des analyses factorielles. Pas plus que d'autres méthodes

statistiques ou d'analyse de données, ces outils ne prouvent en rien qu'il y existe un lien de causalité entre le nombre d'alertes et la vitesse observée en phase de consolidation.

Effet de l'alerte : Les conducteurs qui ont déclenché le système d'alerte en virage, roulent moins vite en phase de consolidation comparativement aux conducteurs qui n'avaient pas de système d'alerte. Les modifications comportementales (accélérations, décélérations et vitesses) sont observées aussi bien en lignes droites qu'en virages. La modification du comportement de conduite est différente entre virages rapides et virages lents (< 60 km/h). La modification de la vitesse maximale au point de corde est surtout sensible dans les virages rapides. A l'opposé, la modification de l'accélération transversale est surtout sensible dans les virages lents.

Limite du système d'alerte : Les entretiens post-expérimentaux ont révélé que lorsque la perception devient consciente, l'alerte n'entraîne pas de modification comportementale (compensation de l'effet induit ?) : les sujets (n = 6) qui se sont rendus compte d'un « flottement » dans la direction ou du dégonflage du siège (n = 1), ont conduit significativement plus vite que les sujets qui n'ont pas exprimé de perception de ce type. Il faut cependant rester prudent dans les conclusions : a) les sujets les plus « sportifs » peuvent également être ceux qui sont les plus sensibles aux réactions du véhicule, b) les sujets qui ont conduit plus vite ont déclenché le système d'alertes un plus grand nombre de fois, augmentant ainsi la probabilité de s'apercevoir d'un problème et c) il n'est pas exclu que d'autres sujets se soient rendus compte du problème mais ne l'aient pas exprimé.

Les conducteurs soumis à une alerte naturelle proprioceptive, agissant au niveau préconscient et simulant les effets de l'approche des capacités dynamiques limites en virage, réduisent leur vitesse aussi bien en virage qu'en ligne droite. L'étude ne permet pas de conclure à la pérennité de cette modification comportementale.

Si l'explication que nous avons suggérée, relative au contrat de performance élevée que se fixe le conducteur au niveau symbolique et qui prendrait le dessus sur l'action des alertes au niveau subsymbolique, est vérifiée, l'hypothèse 3 serait donc peu probable : les « nouvelles » routines de régulation du risque seraient très difficilement acquises de manière durable. Si la routine s'acquière, il serait probablement nécessaire que le conducteur ne prenne pas conscience de la présence de cette alerte pour qu'elle continue à avoir l'effet désiré. Et même si le conducteur n'a pas conscience de l'alerte, il est probable qu'en étant soumis à ce même type de stimulation pendant un certain temps, ses routines de régulation du risque se modifieraient et que l'alerte aurait moins d'effet.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, J.G.U. (1982). The efficacy of seat belt legislation (SAE Paper No. 820819). Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers.
- Amalberti R. (2001). La conduite des systèmes à risques, Paris: PUF (Edition originale 1996).
- Asogwa, S.E. (1980). The crash helmet legislation in Nigeria : a before-and-after study. *Accident Analysis and Prevention*, 12, 213-216.
- Blana, E., Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 44, 303-313.
- Carsten, O. (1981). Use of nationwide personal transportation study to calculate exposure. *The HSRI Research Review*, 11, 1-7.
- Chenier, T.C., & Evans, L. (1985). Motorcyclists fatalities and the repeal of mandatory helmet wearing laws. In *Proceedings of the American Association of Automotive Medicine* (pp. 393-406). Arlington Heights, IL : American Association for Automotive Medicine.
- Essma, S. (2000). Steering Effort Analysis of an Oval Racing Track Setup Champ Car. Paper presented at the 2000 International ADAMS User Conference, June 19-21, Orlando, Florida.
- Evans, L. (1970). Speed estimation from a moving vehicle. *Ergonomics*, 13, 219-230.
- Evans, L. (1985). Human behavior feedback and traffic safety. *Human factors*, 27, 555-576.
- Evans, L., & Wasielewski, P. (1982). Do accident-involved drivers exhibit riskier everyday driving behavior?. *Accident Analysis & Prevention*, 14, 57-64.
- Evans, L., & Wasielewski, P. (1983). Risky driving related to driver and vehicle characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 15, 121-136.
- Fosser, S., & Christensen, P. (1998). Car age and the risk of accidents (Report 386/1988). Oslo: Institute of Transport Economics, cités par Horswill et Coster (2002)
- Fuller, R. (1984). A conceptualization of driving behaviour as threat avoidance. *Ergonomics*, 27, 1139-1155.
- Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche Transport Sécurité*, 66, 47-59.
- Fuller, R.G.C. (1986). Reflections on risk homeostasis theory. In B. Brehmer, H. Jungermann, & S. Sevon (Eds.), *New directions in research on decision making*. Amsterdam: Elsevier.
- Gillespie, T.D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive engineering, 1992: p. 519.
- Hakkert, A.S., & Mahalel, D. (1978). The effect of traffic signals on road accidents-with particular reference to the introduction of a blinking green phase. *Traffic Engineering and Control*, 19, 212-215.
- Hearne, R. (1981). The initial impact of the safety-belt legislation in Ireland (Technical Report RS 255). Dublin : An Foras Fobatha.

- Herms, B.F. (1972). Pedestrian crosswalk study : accidents in painted and unpainted crosswalks. Highway Research Record, 406, 1-13.
- Hoc, J.M., & Blosseville, J.M. (2003). Coopération entre le conducteur et les dispositifs de sécurisation de la conduite automobile (Rapport de Recherche ARCOS). CNRS, IRCCyN, Nantes, F.
- Horswill, M.S., & McKenna, F.P. (1999). The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behaviour : drivers' speed choice. Journal of Applied Psychology, 84, 977-985.
- Kemeny, A., Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. Trends in Cognitive Sciences, 7, 31-37.
- Klein, G., Oranasu, J., Calderwood, R., & Zsombok, C. (Eds.). (1993). Decision making in action : models and methods. Norwood, NJ :Ablex.
- Lee, D. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. Perception, 5, 437-459
- Matthews, M.L., & Cousins, L.R. (1980). The influence of vehicle type on the estimation of velocity while driving. Ergonomics, 23, 1151-1160.
- Näätänen, R., & Summala, H. (1976). A model for the role of motivational factors in driver's decision theory. Accident analysis and prevention, 6, 243-261.
- Peltzman, S. (1975). The effects of automobile safety regulations. Journal of Political Economy, 83, 677-725.
- Ray, H.W. (1983). Evaluation of the safe performance secondary school driver education curriculum demonstration project (Contract No. DOT HS-6-01462). Columbus, OH : Battelle Columbus Laboratory.
- Reymond, G., et al., Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. Hum Factors, 2001. 43(3): p. 483-95.
- Rumar, K., Berggrund, U., Jernberg, P., & Ytterbom, U. (1976). Driver reaction to a technical safety measure-studded tires. Human Factors, 18, 443-454.
- Sagberg, F., Fosser, S., & Saetermo, I.A. (1997). An investigation of behavioural adaptation to airbags and antilock brakes among taxi drivers. Accident Analysis and Prevention, 29, 293-303.
- Siegler I., Reymond G., Kemeny A., Berthoz A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator : contributions of motion cueing in elementary driving tasks. DSC'2001, Septembre 5-7, Sophia-Antipolis, France.
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual? Perception, 25, 1081-1089.
- Summala, H. (1997). Hierarchical model of behavioural adaptation and traffic accidents. In T. Rothengatter & E. Carbonelle Vaya (Eds.), Traffic and Transport Psychology (pp. 41-52). Oxford, UK : Elsevier.
- Wasielewski, P. (1984). Speed as a measure of driver risk : observed speeds versus driver and vehicle characteristics. Accident Analysis and Prevention, 16, 89-103.
- Wilde, G.J.S. (1982a). The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. Risk Analysis, 2, 209-225.

-
- Wilde, G.J.S. (1982b). Critical issues in risk homeostasis theory. *Risk Analysis*, 2, 249-258.
 - Williams, A.F. (1985). Nighttime driving and fatal crash involvement of teenagers. *Accident Analysis and Prevention*, 17, 1-5.
 - Williams, A.F., & O'Neill, B. (1974). On-the-road driving records of licensed race drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 6, 263-270.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|-----------|
| Figure 1 : Principe du profil maîtrise-performance (avec et sans assistance à « coin carré » - (Amalberti, 2003) (exemple : Maîtrise = suivre la ligne médiane d'un virage ; Performance = vitesse de roulage dans le virage)..... | 21 |
| Figure 2 : Statistiques accidentologiques (accidents VP seul) | 23 |
| Figure 3 : Dispositifs concernés par l'alerte..... | 25 |
| Figure 4 : Principe de commande de la DAE (direction assistée électrique) - Emplacements des coussins dans le siège actif..... | 25 |
| Figure 5 : Profil d'accélération transversale de 3 conducteurs sur un parcours sinueux | 27 |
| Figure 6 : Réalisation de la sur-assistance au volant..... | 28 |
| Figure 7 : Caractéristiques techniques des véhicules d'essais | 29 |
| Figure 8: Chaîne d'acquisition des données et de pilotage des alertes..... | 29 |
| Figure 9 : Vue quad des enregistrements vidéo (route, visage, pied et profil du conducteur)..... | 30 |
| Figure 10 : Vue d'ensemble des pistes de SATORY..... | 32 |
| Figure 11 : Exemples d'habillage, signalisation et sécurisation du parcours..... | 32 |
| Figure 12 : Outil de post-traitement | 35 |
| Figure 13 : Rayon de courbure et détection des virages..... | 35 |
| Figure 14 : Découpage des virages | 38 |
| Figure 15 : Répartition de la vitesse moyenne pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule. Le graphique de droite identifie les sujets par leur numéro..... | 39 |
| Figure 16 : Vitesse moyenne pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation pour les 3 groupes, sujet 73 inclus (gauche) et exclu (droite) | 41 |
| Figure 17 : Vitesse moyenne pour les 5 tours de la phase de test et pour chaque type de véhicule, sujet 73 inclus (gauche) et exclu (droite). | 42 |
| Figure 18 : Vitesse moyenne pour les 5 premiers tours de chaque phase et pour chaque type de véhicule | 43 |
| Figure 19 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule ancien, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation). La courbe de régression logarithmique est ajustée sur les 8 premiers tours et est projetée jusqu'au tour 22. Les lignes en pointillés représentent les limites de confiance à 95% de la courbe de régression..... | 44 |
| Figure 20 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule récent, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation). | 44 |
| Figure 21 : Vitesse moyenne pour tous les sujets ayant conduit le véhicule modifié, des tours 1 à 8 (familiarisation) et des tours 18 à 22 (consolidation). | 44 |
| Figure 22 : Répartition de la vitesse moyenne en virages pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule (graphique de droite : identification par numéro) | 45 |
| Figure 23 : Répartition de la vitesse moyenne en lignes droites pour chaque sujet, par tour et par type de véhicule (graphique de droite : identification par numéro) | 46 |
| Figure 24 : Vitesse moyenne en lignes droites (à gauche) et en virages (à droite) pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation..... | 46 |

| | |
|--|-----|
| Figure 25 : Rapport (<i>vitesse moyenne en virages / vitesse moyenne en lignes droites</i>) pour les 5 premiers tours de la phase de familiarisation. | 47 |
| Figure 26 : Vitesse moyenne pour les 5 tours de la phase de test (en virages à gauche et en lignes droites à droite)..... | 47 |
| Figure 27 : Vitesse moyenne en virages (à gauche) et lignes droites (à droite) pour les 5 premiers tours ... | 48 |
| Figure 28 : La vitesse moyenne en fonction de l'expérimentateur ayant accompagné le sujet durant les 3 phases de conduite..... | 49 |
| Figure 29 : Corrélations partielles entre le nombre d'alertes déclenchées en phase de test et la vitesse moyenne en phase de consolidation | 51 |
| Figure 30 : Vitesse relative moyenne entre la phase de familiarisation et la phase de consolidation par type de véhicule..... | 52 |
| Figure 31 : Vitesse relative moyenne en fonction du nombre d'alerte en phase de test | 52 |
| Figure 32: Virages sur parcours..... | 53 |
| Figure 33 : Vitesse au point de corde en fonction de la géométrie du virage..... | 54 |
| Figure 34 : Vitesse au point de corde | 54 |
| Figure 35 : Vitesse au point de corde en fonction de la phase de conduite | 55 |
| Figure 36 : ACP pour le Groupe véhicule « Ancien »..... | 57 |
| Figure 37 : ACP pour le Groupe véhicule « Récent »..... | 57 |
| Figure 38 : ACP pour le Groupe véhicule « Modifié » | 58 |
| Figure 39 : Accélération Transversale Maximale | 59 |
| Figure 40 : Vitesse maximale en ligne droite..... | 63 |
| Figure 41 : Vitesse maximale en ligne droite..... | 63 |
| Figure 42 : Vitesse maximale en ligne droite..... | 64 |
| Figure 43 : Vitesse moyenne, en virage (à gauche) et en ligne droite (à droite), selon la phase de conduite pour le véhicule « modifié » | 72 |
| Figure 44 : Mouvements de caisse | 85 |
| Figure 45 : Dynamique dans le plan (définition de l'angle de dérive)..... | 85 |
| Figure 46 : Circuit routier de Satory - Désignation des courbes | 88 |
| Figure 47. Courbes du parcours Figure 48. Lignes droites du parcours | 88 |
| Figure 49 : Architecture logicielle | 89 |
| Figure 50: Exemples de paramètres extraits | 90 |
| Figure 51 : Modèle d'accélération transversale en fonction de la vitesse | 91 |
| Figure 52 : Mode de la valeur absolue de l'accélération transversale..... | 91 |
| Figure 53 : Vitesse au point de corde (Phases de Familiarisation et de Test)..... | 96 |
| Figure 54 : Analyse factorielle (véhicule <i>Ancien</i>) | 97 |
| Figure 55 : Analyse factorielle (véhicule <i>Récent</i>) | 98 |
| Figure 56 : Analyse factorielle (véhicule <i>Modifié</i>)..... | 98 |
| Figure 57 : Différence entre les 3 véhicules sur l'accélération maximale | 99 |
| Figure 58 : Corrélations partielles entre l'accélération maximale et la vitesse au point de corde..... | 99 |
| Figure 59 : Corrélations partielles entre le nombre d'alertes déclenchées (phase test) et l'accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule <i>ancien</i>) par analyse en composantes principales | 100 |

| | |
|---|------------|
| Figure 60 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et l’accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule <i>récent</i>) par analyse en composantes principales | 100 |
| Figure 61 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et l’accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule <i>modifié</i>) par analyse en composantes principales | 101 |
| Figure 62 : Différence entre les 3 véhicules sur la décélération maximale | 101 |
| Figure 63 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. <i>ancien</i>) par analyse en composantes principales | 102 |
| Figure 64 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. <i>récent</i>) par analyse en composantes principales | 102 |
| Figure 65 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. <i>modifié</i>) par analyse en composantes principales | 103 |

TABLE DE REFERENCES

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques des 55 conducteurs participants | 24 |
| Tableau 2 : Liste des paramètres enregistrés | 31 |
| Tableau 3 : Description des 3 phases expérimentales | 33 |
| Tableau 4 : Age pour chaque groupe de sujet | 39 |
| Tableau 5 : Nombre d'années de conduite pour chaque groupe de sujet | 39 |
| Tableau 6 : Nombre de kilomètres parcourus annuellement | 39 |
| Tableau 7 : Probabilités des comparaisons a posteriori entre les 3 groupes (phase de test). | 42 |
| Tableau 8 : Tests univariés et multivariés pour les facteurs groupes, phase et tour et les interactions entre ces 3 facteurs (sujet 73 exclu) | 42 |
| Tableau 9 : Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation | 45 |
| Tableau 10 : Probabilités des comparaisons a posteriori entre les 3 groupes (phase de test) : comparaisons a posteriori (Newman-Keuls) | 48 |
| Tableau 11 : Tests univariés et multivariés pour les effets (facteurs groupes, phase, tour et les interactions entre ces facteurs) sur la vitesse moyenne en virages..... | 48 |
| Tableau 12 : Tests univariés et multivariés pour les effets (facteurs groupes, phase, tour et les interactions entre ces facteurs) sur la vitesse moyenne en lignes droites..... | 49 |
| Tableau 13 : Corrélations partielles – Effet de l’alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne sur tout le parcours)..... | 50 |
| Tableau 14 : Corrélations partielles – Effet de l’alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne sur toutes les lignes droites)..... | 50 |
| Tableau 15 : Corrélations partielles – Effet de l’alerte sur le comportement du conducteur (Vitesse moyenne dans tous les virages) | 50 |
| Tableau 16 : Tests multivariés pour mesures répétées | 53 |
| Tableau 17 : Tests multivariés pour mesures répétées | 54 |
| Tableau 18 : Corrélations partielles pour les 3 groupes..... | 55 |
| Tableau 19 : Corrélations partielles pour les 3 groupes..... | 56 |
| Tableau 20 : Tests multivariés pour mesures répétées | 59 |
| Tableau 21 : Tests multivariés pour mesures répétées | 62 |
| Tableau 22 : Tests multivariés pour mesures répétées | 64 |
| Tableau 23 : Corrélations partielles..... | 65 |
| Tableau 24 : Forme finale des bases de données objectives (après traitement)..... | 90 |
| Tableau 25 : Test d'homogénéité des variances pour l'ensemble des variables dépendantes | 93 |
| Tableau 26 : Test de Normalité pour les différentes variables dépendantes. | 93 |
| Tableau 27 : Test de sphéricité de la variable <i>vitesse moyenne</i> pour les facteurs à mesures répétées. | 94 |
| Tableau 28. Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation en virages (avec les marges d'erreurs à 95% de l'ordonnée à | |

| | |
|---|------------|
| l'origine, la probabilité du test du modèle, le coefficient de corrélation entre les données brutes et les données d'ajustement et le pourcentage de variance expliquée par le modèle)..... | 95 |
| Tableau 29 : Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation en lignes droites | 95 |
| Tableau 30 : Corrélations partielles..... | 96 |
| Tableau 31 : Corrélations partielles..... | 96 |
| Tableau 32 : Tests multivariés pour mesures répétées (Accélération maximale) | 98 |
| Tableau 33 : Corrélations partielles..... | 99 |
| Tableau 34 : Tests multivariés pour mesures répétées (<i>Décélération maximale</i>) | 101 |
| Tableau 35 : Corrélations partielles..... | 102 |

ANNEXES

Annexe 1. Rappel de quelques notions de dynamique véhicule

Description du mouvement d'un véhicule

Les mouvements de caisse d'un véhicule peuvent être décrits par 3 translations et 3 rotations. Le **lacet** est l'angle de rotation de la caisse autour de son axe vertical, le **roulis** l'angle de rotation autour de l'axe longitudinal, et le **tangage** est l'angle de rotation autour de l'axe transversal.

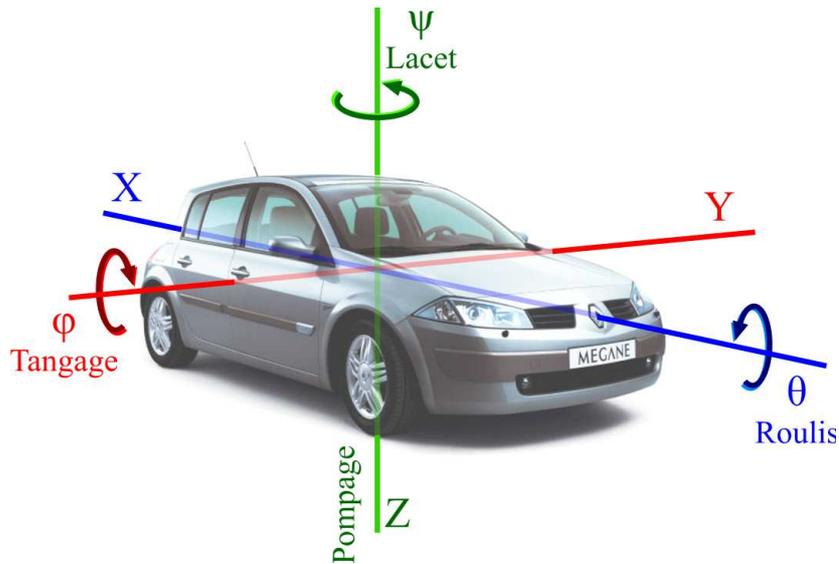


Figure 44 : Mouvements de caisse

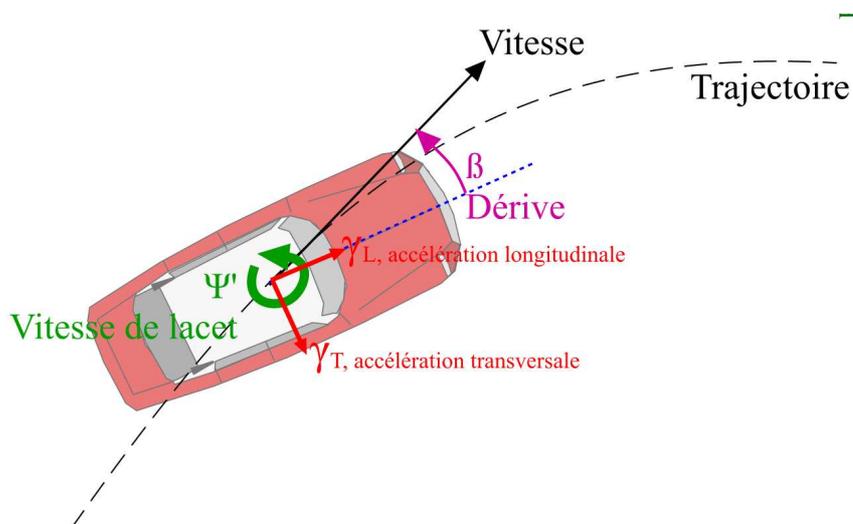


Figure 45 : Dynamique dans le plan (définition de l'angle de dérive)

Les variables dynamiques décrites ci-dessous correspondent aux dérivées premières et secondes de la position du centre de gravité et de l'angle de lacet, et décrivent donc le mouvement dans le plan du véhicule.

Vitesse longitudinale

La vitesse longitudinale est la projection du vecteur vitesse (dérivée du vecteur position, tangent à la trajectoire) sur l'axe longitudinal du véhicule. L'angle de dérive étant en général « petit », la vitesse longitudinale peut être considérée comme identique au module du vecteur vitesse.

Dérive

La dérive est l'angle entre le vecteur vitesse (tangent à la trajectoire du véhicule) et l'axe longitudinal de la caisse. Il caractérise donc directement l'amplitude d'un dérapage.

Vitesse de lacet

La vitesse de lacet est le taux de rotation de la voiture autour de son axe vertical (c'est-à-dire la dérivée de l'angle de lacet). Dans de bonnes conditions d'adhérence, la vitesse de lacet est d'autant plus importante que le braquage du volant et la vitesse du véhicule le sont.

Accélération transversale

L'accélération transversale est la projection du vecteur accélération (dérivée du vecteur vitesse) sur l'axe transversal du véhicule. On peut également l'appeler "force centrifuge". Elle est générée par le fait de refermer la trajectoire de la voiture tout en gardant une certaine vitesse. Plus la trajectoire est serrée (et donc le rayon de courbure faible), plus l'accélération transversale va être importante toutes choses (vitesse) égales par ailleurs. De même, pour un même rayon de courbure, plus la vitesse est importante, plus l'accélération transversale va être importante. De manière plus précise, l'accélération transversale est proportionnelle à l'inverse du rayon de courbure de la trajectoire et augmente avec le carré de la vitesse.

C'est un paramètre particulièrement intéressant car elle correspond aux efforts s'appliquant de manière transversale aux pneus. Elle caractérise donc directement l'utilisation du potentiel du véhicule (environ 1g au maximum en régime établi). Par la vertu du principe d'action et de réaction, elle caractérise également les contraintes appliquées au conducteur et à ses passagers.

Accélération longitudinale

L'accélération longitudinale est la projection du vecteur accélération (dérivée du vecteur vitesse) sur l'axe longitudinal du véhicule.

Les valeurs positives correspondent aux phases d'accélération du véhicule. Cette variable est limitée en haut par les capacités d'accélération (la puissance) du véhicule et par l'adhérence (si on tente d'accélérer au-delà de ce que l'adhérence autorise, les roues patinent et perdent leur pouvoir directeur. Dans ces conditions, si le véhicule est équipé d'un ASR, celui-ci intervient, cf. ci-dessous).

Les valeurs négatives correspondent aux phases de décélération du véhicule. Elles sont limitées par les capacités de freinage du véhicule et par l'adhérence (si on tente de freiner au-delà de ce que l'adhérence permet, les roues se bloquent et perdent leur pouvoir directeur. Dans ces conditions, si le véhicule est équipé d'un ABS, celui-ci intervient, cf. ci-dessous).

Assistances dynamiques

Système antiblocage (ABS)

L'ABS prévient le blocage des roues au freinage et permet ainsi de conserver la dirigeabilité du véhicule, même lors d'un freinage d'urgence, et même sur une faible

adhérence. Il permet ainsi de combiner sans risque de perte de contrôle les manœuvres de freinage et d'évitement d'un obstacle. L'ABS participe donc à la stabilité du véhicule dans les phases de freinages.

Régulation antipatinage (ASR)

Grâce à des interventions rapides sur le système de gestion du moteur et sur les freins, l'ASR empêche le patinage des roues motrices. Il autorise un démarrage sûr sur une chaussée glissante (même si elle n'est glissante que d'un seul côté) et il réduit le risque de dérapage lors de fortes accélérations dans un virage, en particulier sur les véhicules à traction arrière. L'ASR participe donc à la stabilité du véhicule dans les phases d'accélération.

Contrôle actif du lacet ou AYC (Active Yaw Control)

Elément principal du système ESP (*Electronic Stability Program*) le contrôle actif de lacet permet de réduire les risques de perte de contrôle en « toutes circonstances ». Il détecte les situations nécessitant une intervention en comparant continuellement la vitesse de lacet réelle du véhicule (mesurée avec un gyromètre) avec une vitesse de lacet « idéale » calculée à partir des actions conducteur (angle volant) et de la vitesse du véhicule. Si les deux valeurs divergent trop, cela signifie que le véhicule sort de la trajectoire souhaitée par le conducteur. Le système agit alors de manière ciblée sur chacune des roues par des freinages et intervient sur le système de contrôle moteur afin de stabiliser rapidement le véhicule sur la trajectoire souhaitée. L'ESP participe donc à la stabilité du véhicule en permanence.

Technologies

Bus CAN

Le CAN (*Controller Area Network*) est un standard de communications séries largement utilisé dans l'industrie automobile. Il a pour but la mise en réseau de calculateurs devant s'échanger un grand nombre d'informations. Une grande partie des paramètres d'utilisation et de fonctionnement d'un véhicule sont donc mesurables sur son réseau CAN principal. On y trouve les signaux mesurés par des capteurs (vitesse du véhicule, régime moteur...), et l'état d'activation des différents équipements (régulation ABS...).

Annexe 2. Découpage du parcours

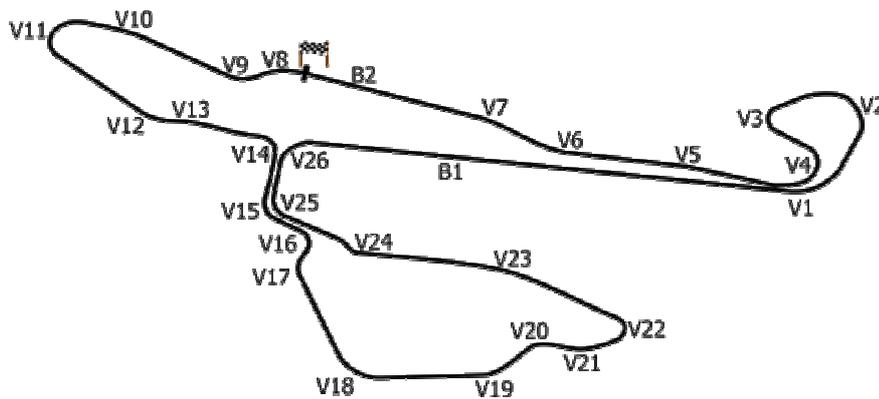


Figure 46 : Circuit routier de Satory - Désignation des courbes⁶

| Désignation | Sens | Rayon minimum piste (m) | Rayon trajectoire moyen (m) |
|-------------|------|-------------------------|-----------------------------|
| V1 | G | 85 | 117 |
| V2 | G | 70 | 90 |
| V3 | G | 26 | 34 |
| V4 | D | 48 | 49 |
| V5 | G | 250 | 506 |
| V6 | D | 220 | 266 |
| V7 | G | 115 | 252 |
| V8 | G | 64 | . |
| V9 | D | 50 | 75 |
| V10 | G | 200 | 640 |
| V11 | G | 44 | 56 |
| V12 | G | 65 | 111 |
| V13 | D | 80 | 168 |
| V14 | D | . | 34 |
| V15 | G | . | 58 |
| V16 | D | . | 46 |
| V17 | G | . | 72 |
| V18 | G | . | 147 |
| V19 | G | . | 80 |
| V20 | D | . | 44 |
| V21 | G | . | 106 |
| V22 | G | . | 33 |
| V23 | G | . | 389 |
| V24 | D | . | 68 |
| V25 | D | . | 51 |
| V26 | D | . | 37 |

Figure 47. Courbes du parcours

| Désignation | Longueur (m) |
|-------------|--------------|
| V9_V11 | 359 |
| V11_V12 | 264 |
| V13_V14 | 136 |
| V14_V15 | 160 |
| V17_V18 | 265 |
| V18_V19 | 255 |
| V22_V23 | 284 |
| V23_V24 | 227 |
| V24_V25 | 178 |
| V25_V26 | 143 |
| V26_B1 | 392 |
| B1_V1 | 515 |
| V1_V2 | 223 |
| V4_V6 | 470 |
| V7_V8 | 327 |
| V4_V8 | 928 |
| V22_V25 | 693 |

Figure 48. Lignes droites du parcours

⁶ B1 désigne une chicane rajoutée («zone travaux») assez ouverte. B2 est une chicane uniquement présente en phase « Test » et beaucoup plus fermée.

Annexe 3. Architecture logicielle (acquisition et traitement des données)

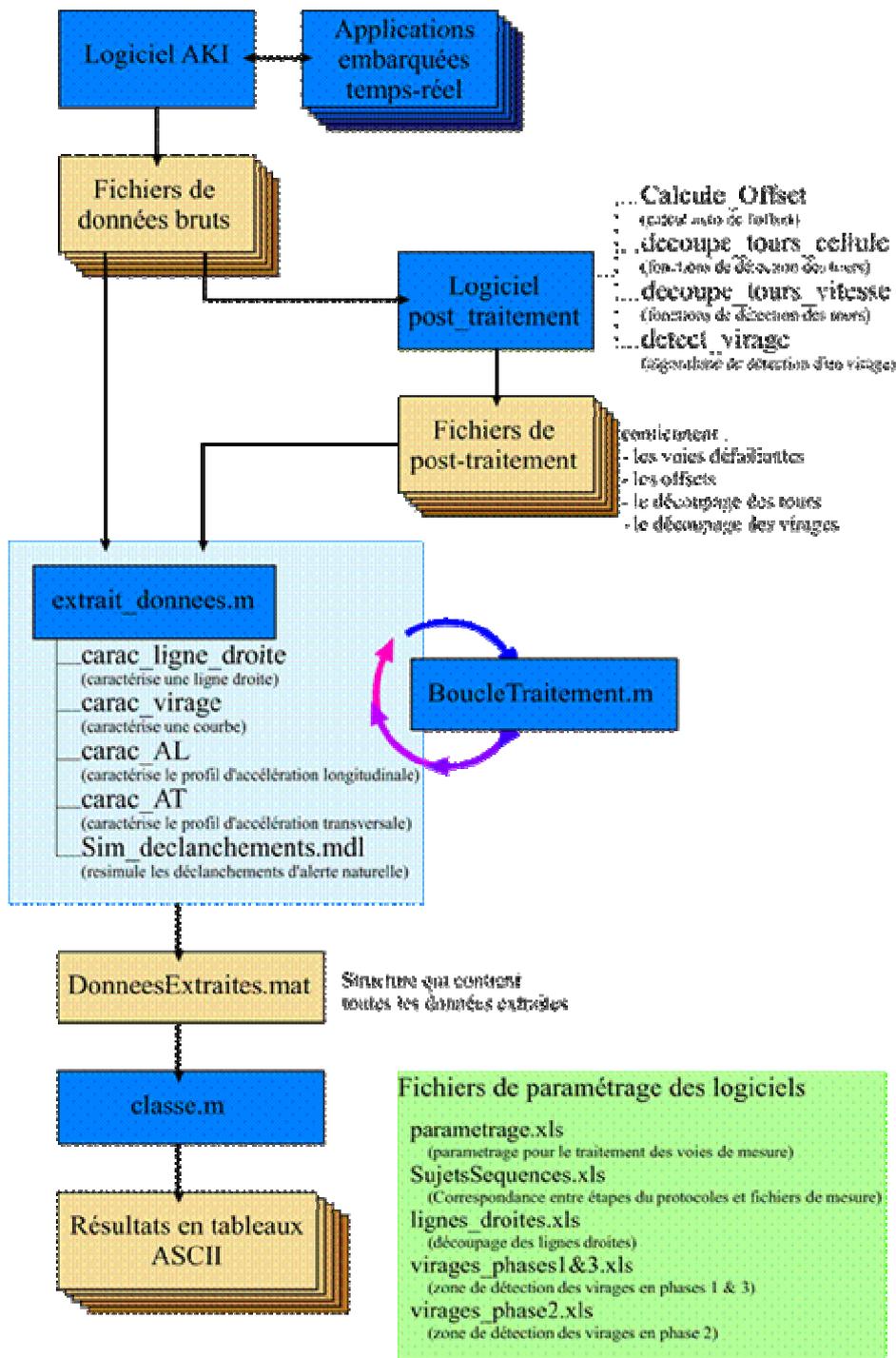


Figure 49 : Architecture logicielle

Annexe 4. Exemples de paramètres extraits

| N° sujet | Groupe | Phase 1 | | Phase 2 | | Phase 3 | |
|-------------|--------|---|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | Paramètres macroscopiques ⁷ | Paramètres microscopiques ⁸ | Paramètres macroscopiques | Paramètres microscopiques | Paramètres macroscopiques | Paramètres microscopiques |
| 1 | G1 | | | | | | |
| 2 | G1 | | | | | | |
| ... | G1 | | | | | | |
| 19 | G1 | | | | | | |
| 1 | G2 | | | | | | |
| 2 | G2 | | | | | | |
| ... | G2 | | | | | | |
| 17 | G2 | | | | | | |
| 1 | G3 | | | | | | |
| 2 | G3 | | | | | | |
| ... | G3 | | | | | | |
| 19 | G3 | | | | | | |

Tableau 24 : Forme finale des bases de données objectives (après traitement)

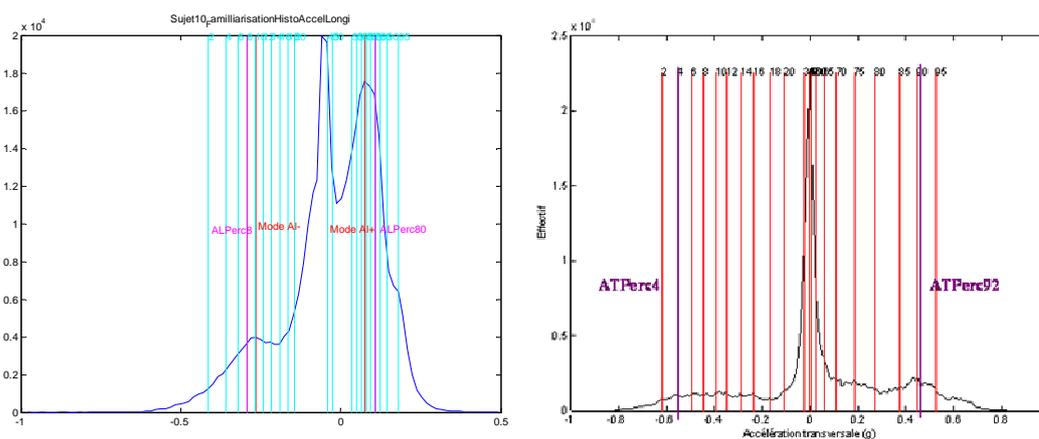


Figure 50: Exemples de paramètres extraits

ATPerc92 : 92^e percentile de la variable accélération transversale (virages à gauche).

ATPerc4 : 4^e percentile de la variable accélération transversale (virages à droite).

ATMaxD : Accélération transversale maximum dans les virages à droite.

ATMaxG : Accélération transversale maximum dans les virages à gauche.

⁷ Par exemple, la vitesse moyenne ou le temps mis par tour du parcours...

⁸ Par exemple, l'accélération latérale maximale dans le virage V6 sur parcours...

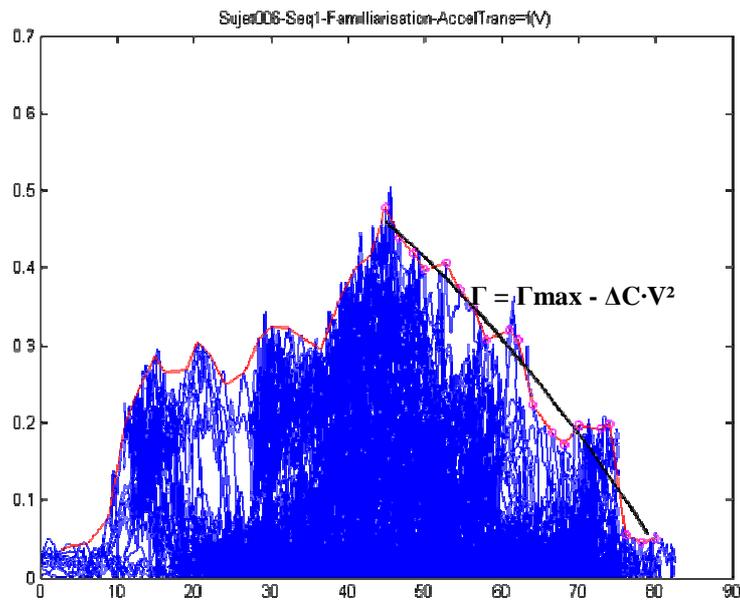


Figure 51 : Modèle d'accélération transversale en fonction de la vitesse

Ecart ΔC admis sur la courbure, en km^{-1} (dans la modélisation $\Gamma < \Gamma_{\text{max}} - \Delta C \cdot V^2$, sur la partie décroissante de l'enveloppe d'accélération transversale).

Coefficient Γ_{max} de la régression $\Gamma_{\text{max}} - \Delta C \cdot V^2$ sur la partie décroissante de l'enveloppe d'accélération transversale. Ne correspond pas nécessairement à l'accélération maximum réelle.

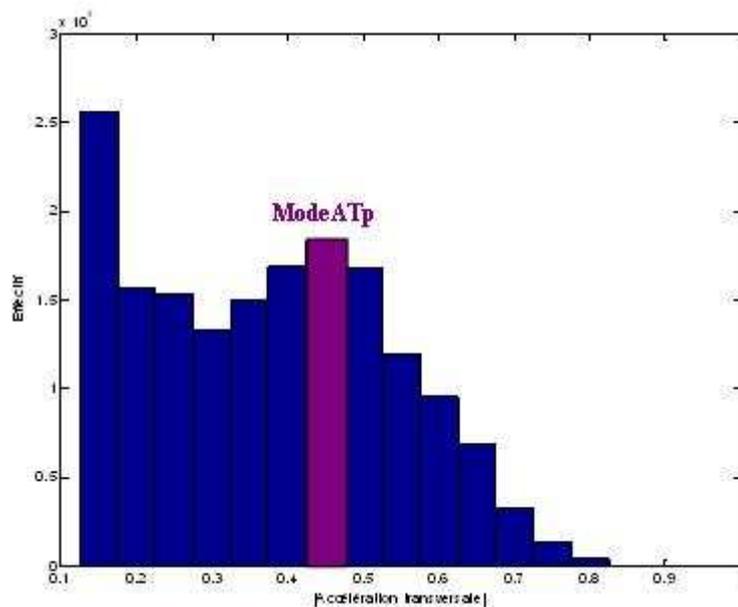


Figure 52 : Mode de la valeur absolue de l'accélération transversale

Annexe 5. Codage des variables subjectives

Les réponses aux questions du psychologue ont été codifiées pour l'analyse statistique lorsqu'elles étaient suffisamment détaillées pour créer une variable ordinale ou dichotomique. Chacune des questions posées est reportée sous sa forme codée avec le tableau des répartitions. Ces variables ont été corrélées aux indices moyens de conduite (e.g., vitesse en virage, vitesse en ligne droite) lorsque les données étaient suffisamment nombreuses. Un grand nombre de questions n'ont pu être analysées de manière quantitative soit parce qu'elles ne présentaient pas un nombre suffisant de données, soit leur codage sur une échelle ordinale ou dichotomique n'était pas possible.

Annexe 6. Tests statistiques préalables**Tests d'homogénéité des variances, normalité et de sphéricité****Exemple d'application sur la variable *vitesse moyenne par tour***

Les tests d'homogénéités des variances et de normalités ont été conduits de manière identique à celle décrite pour la variable *vitesse moyenne sur l'ensemble du tour*. Les tests révèlent, tout comme pour la vitesse moyenne sur l'ensemble des tours, que la vitesse moyenne en virages et en lignes droites se distribue normalement pour l'ensemble des tours. Les variances des différents groupes ne diffèrent pas significativement.

| Sujet 73 exclu | | | Sujet 73 inclu | | |
|-----------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| Variable Mesurée | F | p | Variable Mesurée | F | p |
| Fam 1 | 0,196377 | 0,822333 | Fam 1 | 0,323317 | 0,725189 |
| Fam 2 | 0,010064 | 0,989989 | Fam 2 | 0,302655 | 0,740147 |
| Fam 3 | 0,075882 | 0,927032 | Fam 3 | 0,156657 | 0,855400 |
| Fam 4 | 2,043695 | 0,140233 | Fam 4 | 1,933349 | 0,154920 |
| Fam 5 | 0,969210 | 0,386536 | Fam 5 | 1,301530 | 0,280999 |
| Fam 6 | 0,548312 | 0,581429 | Fam 6 | 1,076429 | 0,348426 |
| Fam 7 | 1,032728 | 0,363809 | Fam 7 | 1,481510 | 0,237100 |
| Fam 8 | 1,854125 | 0,170847 | Fam 8 | 1,176887 | 0,319219 |
| Test 1 | 0,248465 | 0,780955 | Test 1 | 0,084063 | 0,919498 |
| Test 2 | 0,460902 | 0,633367 | Test 2 | 0,140387 | 0,869350 |
| Test 3 | 0,590485 | 0,557875 | Test 3 | 0,164819 | 0,848489 |
| Test 4 | 1,295561 | 0,282774 | Test 4 | 0,338090 | 0,714687 |
| Test 5 | 1,125870 | 0,332454 | Test 5 | 0,437937 | 0,647725 |
| Test 6 | 0,595856 | 0,554956 | Test 6 | 0,440344 | 0,646193 |
| Test 7 | 0,710162 | 0,497239 | Test 7 | 0,872166 | 0,425146 |
| Test 8 | 0,191695 | 0,826260 | Test 8 | 0,220475 | 0,803019 |
| Test 9 | 1,274612 | 0,289888 | Test 9 | 1,640767 | 0,205468 |
| Consolidation 1 | 0,859184 | 0,429665 | Consolidation 1 | 0,884499 | 0,419041 |
| Consolidation 2 | 0,494434 | 0,612866 | Consolidation 2 | 0,513834 | 0,601203 |
| Consolidation 3 | 1,087098 | 0,345029 | Consolidation 3 | 0,616841 | 0,543548 |
| Consolidation 4 | 1,997338 | 0,146378 | Consolidation 4 | 1,438576 | 0,246551 |
| Consolidation 5 | 0,576916 | 0,565396 | Consolidation 5 | 0,796209 | 0,456562 |

Tableau 25 : Test d'homogénéité des variances pour l'ensemble des variables dépendantes

| | Véhicule Ancien | | Véhicule Récent | | Véhicule Modifié | | | |
|-----------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|----------------|------------|
| | | | | | Sujet 73 inclus | | Sujet 73 exclu | |
| | d K-S | Lilliefors | d K-S | Lilliefors | d K-S | Lilliefors | d K-S | Lilliefors |
| Fam 1 | 0.16 | ns | 0.07 | ns | 0.14 | ns | 0.16 | ns |
| Fam 2 | 0.12 | ns | 0.07 | ns | 0.16 | ns | 0.08 | ns |
| Fam 3 | 0.13 | ns | 0.08 | ns | 0.14 | ns | 0.12 | ns |
| Fam 4 | 0.13 | ns | 0.10 | ns | 0.15 | ns | 0.18 | ns |
| Fam 5 | 0.18 | ns | 0.09 | ns | 0.17 | ns | 0.18 | ns |
| Fam 6 | 0.18 | ns | 0.10 | ns | 0.15 | ns | 0.13 | ns |
| Fam 7 | 0.19 | ns | 0.11 | ns | 0.13 | ns | 0.10 | ns |
| Fam 8 | 0.21 | ns | 0.12 | ns | 0.17 | ns | 0.15 | ns |
| Test 1 | 0.14 | ns | 0.08 | ns | 0.16 | ns | 0.17 | ns |
| Test 2 | 0.14 | ns | 0.09 | ns | 0.17 | ns | 0.14 | ns |
| Test 3 | 0.21 | <0.05 | 0.12 | <0.05 | 0.16 | ns | 0.14 | ns |
| Test 4 | 0.13 | ns | 0.08 | ns | 0.08 | ns | 0.08 | ns |
| Test 5 | 0.13 | ns | 0.07 | ns | 0.16 | ns | 0.19 | ns |
| Test 6 | 0.19 | ns | 0.10 | ns | 0.13 | ns | 0.14 | ns |
| Test 7 | 0.17 | ns | 0.11 | ns | 0.18 | ns | 0.19 | ns |
| Test 8 | 0.17 | ns | 0.09 | ns | 0.14 | ns | 0.15 | ns |
| Test 9 | 0.20 | ns | 0.09 | ns | 0.15 | ns | 0.16 | ns |
| Consolidation 1 | 0.11 | ns | 0.07 | ns | 0.15 | ns | 0.15 | ns |
| Consolidation 2 | 0.13 | ns | 0.06 | ns | 0.13 | ns | 0.12 | ns |
| Consolidation 3 | 0.08 | ns | 0.05 | ns | 0.13 | ns | 0.12 | ns |
| Consolidation 4 | 0.16 | ns | 0.08 | ns | 0.14 | ns | 0.15 | ns |
| Consolidation 5 | 0.13 | ns | 0.08 | ns | 0.15 | ns | 0.14 | ns |

Tableau 26 : Test de Normalité pour les différentes variables dépendantes.

Le test de sphéricité de Mauchly a été appliqué sur l'ensemble des facteurs répétés (Phase, Tours & Phases \times Tours). Les facteurs "Tours" & "Phase \times Tours" ne remplissent pas la condition de sphéricité. Par conséquent, leurs effets seront évalués par un modèle multivarié.

| | | W | χ^2 | dl | P |
|-----------------------------------|-----------------------|----------|----------|----|----------|
| Tout type d'infrastructure | Phases | 0,981655 | 0,8702 | 2 | 0,647199 |
| | Tours | 0,290759 | 57,3367 | 9 | 00 |
| | Phases \times Tours | 0,078663 | 114,7338 | 35 | 00 |
| Virage | Phases | 0,971006 | 1,4123 | 2 | 0,493541 |
| | Tours | 0,275804 | 61,0757 | 9 | 00 |
| | Phases \times Tours | 0,111801 | 101,0616 | 35 | 00 |
| Lignes droites | Phases | 0,960326 | 1,9432 | 2 | 0,378481 |
| | Tours | 0,318813 | 54,2043 | 9 | 00 |
| | Phases \times Tours | 0,069055 | 123,2855 | 35 | 00 |

Tableau 27 : Test de sphéricité de la variable *vitesse moyenne* pour les facteurs à mesures répétées.

Annexe 7. Modèle d'ajustement de la variable vitesse moyenne entre les phases de familiarisation et la phase de consolidation

| Virages | Modèle tours 1 à 8 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
|---------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------|----------------|
| Ancien | $y = 49.09 + \log_2(x)$ | 48.37 | 49.82 | < 0.01 | 0.23 | 0.05 |
| Récent | $y = 51.62 + \log_2(x)$ | 50.86 | 52.37 | < 0.01 | 0.30 | 0.09 |
| Modifié | $y = 50.82 + \log_2(x)$ | 49.77 | 51.87 | < 0.01 | 0.16 | 0.03 |
| | Modèle tours 18 à 22 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
| Ancien | $y = 50.19 + \log_2(x)$ | 50.30 | 51.08 | < 0.01 | 0.04 | 0.001 |
| Récent | $y = 53.64 + \log_2(x)$ | 52.39 | 54.89 | < 0.01 | 0.05 | 0.003 |
| Modifié | $y = 52.15 + \log_2(x)$ | 50.99 | 53.29 | < 0.01 | 0.06 | 0.003 |

Tableau 28. Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation en virages (avec les marges d'erreurs à 95% de l'ordonnée à l'origine, la probabilité du test du modèle, le coefficient de corrélation entre les données brutes et les données d'ajustement et le pourcentage de variance expliquée par le modèle)

| Lignes Droites | Modèle tours 1 à 8 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
|----------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------|----------------|
| Ancien | $y = 57.04 + \log_2(x)$ | 56.23 | 57.85 | < 0.01 | 0.26 | 0.07 |
| Récent | $y = 60.39 + \log_2(x)$ | 59.48 | 61.30 | < 0.01 | 0.26 | 0.09 |
| Modifié | $y = 59.06 + \log_2(x)$ | 58.11 | 60.01 | < 0.01 | 0.19 | 0.04 |
| | Modèle tours 18 à 22 | Lim inf 95% | Lim sup 95% | Test modèle | R | R ² |
| Ancien | $y = 59.68 + \log_2(x)$ | 58.73 | 60.64 | < 0.01 | 0.06 | 0.004 |
| Récent | $y = 62.14 + \log_2(x)$ | 60.73 | 63.55 | < 0.01 | 0.07 | 0.005 |
| Modifié | $y = 60.08 + \log_2(x)$ | 60.08 | 62.38 | < 0.01 | 0.07 | 0.005 |

Tableau 29 : Equation des fonctions d'ajustement pour chaque véhicule et pour les phases de familiarisation et de consolidation en lignes droites

Annexe 8. Corrélations partielles – Effet de l’alerte sur le comportement du conducteur (exemple d’une variable microscopique) dans les virages

Vitesse au point de corde

La figure ci-dessous donne la vitesse au point de corde pour chaque groupe et pour l’ensemble des 25 virages dans les phases de Familiarisation et de Consolidation.

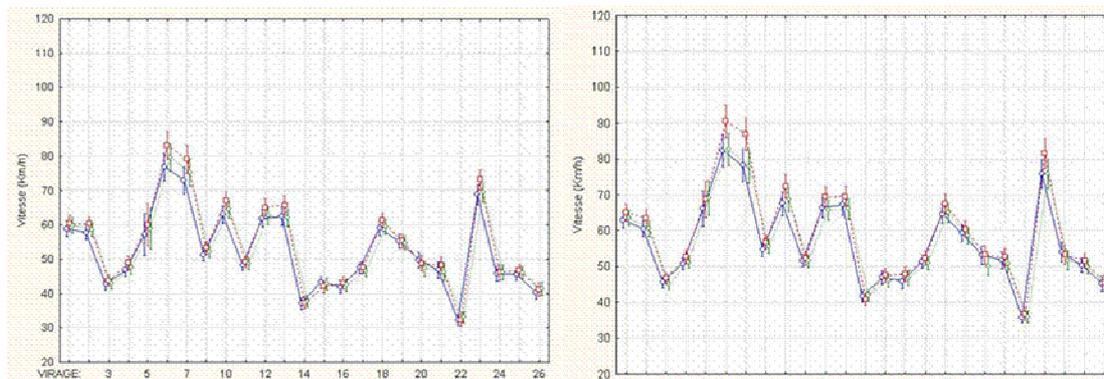


Figure 53 : Vitesse au point de corde (Phases de Familiarisation et de Test)

Accélération Transversale Maximale

Virages lents

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Véhicule Ancien | Nombre d’alertes | 0,06021 | 0,594885 | 0,40512 | 0,24126 | 0,812421 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,56704 | 0,594885 | 0,40512 | 2,75366 | 0,014127 |
| Véhicule Récent | Nombre d’alertes | 0,18157 | 0,853562 | 0,14644 | 0,69086 | 0,500949 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,50379 | 0,853562 | 0,14644 | 2,18217 | 0,046631 |
| Véhicule Modifié | Nombre d’alertes | 0,59895 | 0,956550 | 0,04345 | 2,89685 | 0,011065 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,48508 | 0,956550 | 0,04345 | 2,14842 | 0,048420 |

Tableau 30 : Corrélations partielles

Virages Rapides

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|---------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d’alertes | -0,0686 | -0,06792 | 0,99524 | 0,00476 | -0,2752 |
| | Vitesse en Familiarisation | 0,14120 | 0,140772 | 0,99524 | 0,00476 | 0,57052 |
| Véhicule Récent | Nombre d’alertes | 0,11797 | 0,859503 | 0,14049 | 0,44451 | 0,66347 |
| | Vitesse en Familiarisation | -0,2966 | 0,859503 | 0,14049 | -1,1619 | 0,26468 |
| Véhicule Modifié | Nombre d’alertes | 0,11347 | 0,952190 | 0,04781 | 0,44232 | 0,66457 |
| | Vitesse en Familiarisation | -0,0148 | 0,952190 | 0,04781 | -0,0575 | 0,95489 |

Tableau 31 : Corrélations partielles

Annexe 9. Corrélations partielles – Effet de l’alerte sur le comportement du conducteur (exemple d’une variable microscopique) dans les lignes droites

Vitesse maximale

Le premier axe (vertical) semble rendre compte de la différenciation des différentes lignes droites avec une plus grande proximité à cet axe pour les lignes droites plus longues. Le second facteur, expliquant une moins grande part de variance que le premier, la différenciation porte clairement sur la phase expérimentale. Il apparaît ainsi que pour les groupes « véhicule ancien » et « véhicule récent » les phases de familiarisation et de consolidation sont similaires avec une opposition à la phase de test. A l’opposé, pour le groupe « véhicule modifié », ce sont les phases de test et de consolidation qui présente la plus grande similarité avec une nette opposition de ces deux phases à la phase de familiarisation. Ceci suggère fortement que la vitesse maximale adoptée par les sujets ayant conduit sur le véhicule modifié est liée à la vitesse maximale adoptée en phase de test.

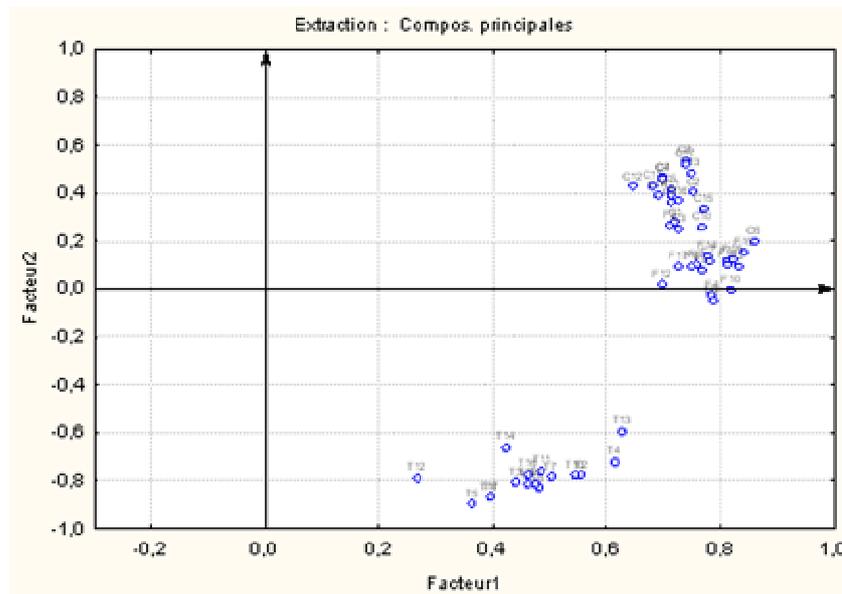


Figure 54 : Analyse factorielle (véhicule Ancien)

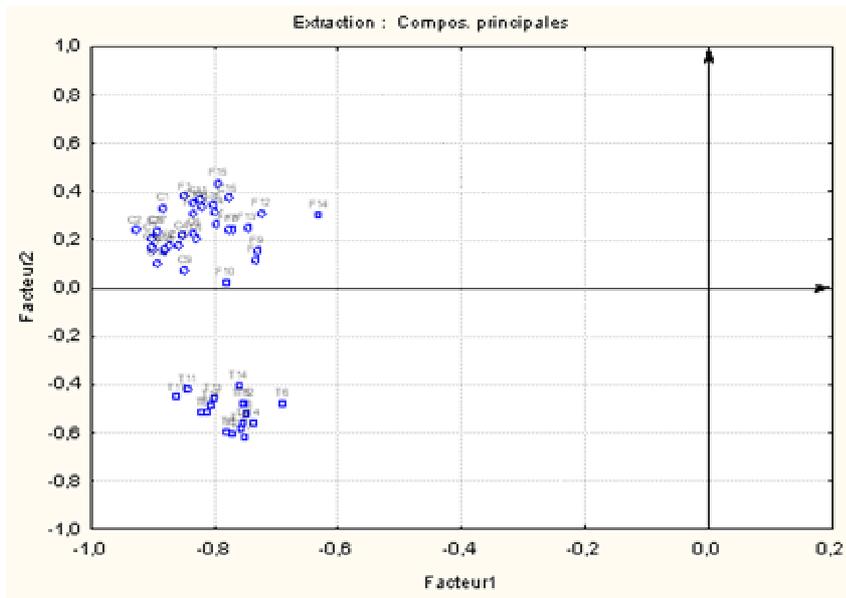


Figure 55 : Analyse factorielle (véhicule *Récent*)

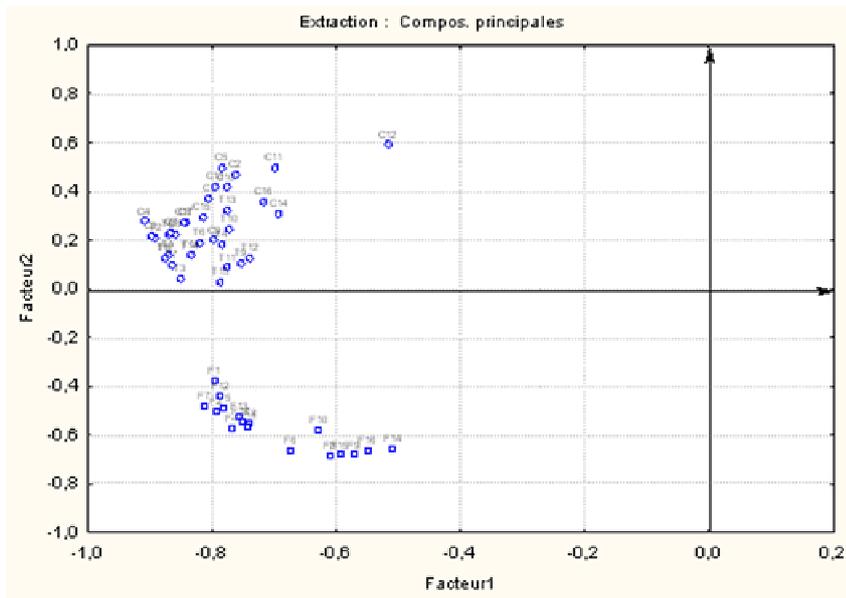


Figure 56 : Analyse factorielle (véhicule *Modifié*)

Accélération maximale

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|---|------|---------|----------|-------|--------|---------|
| Groupe | | | 10.50 | 2 | 51 | 0.00000 |
| Lignes droites | Wilk | 0.00929 | 239.9837 | 16 | 36 | 0.00000 |
| Lignes droites x Groupe | Wilk | 0.31077 | 1.7861 | 32 | 72 | 0.02168 |
| Phases | Wilk | 0.11191 | 198.4030 | 2 | 50 | 0.00000 |
| Phases x Groupe | Wilk | 0.94761 | 0.6818 | 4 | 100 | 0.60615 |
| Lignes droites x Phase | Wilk | 0.00983 | 62.9412 | 32 | 20 | 0.00000 |
| Lignes droites x Phases x Groupe | Wilk | 0.19048 | 0.8070 | 64 | 40 | 0.78109 |

Tableau 32 : Tests multivariés pour mesures répétées (Accélération maximale)

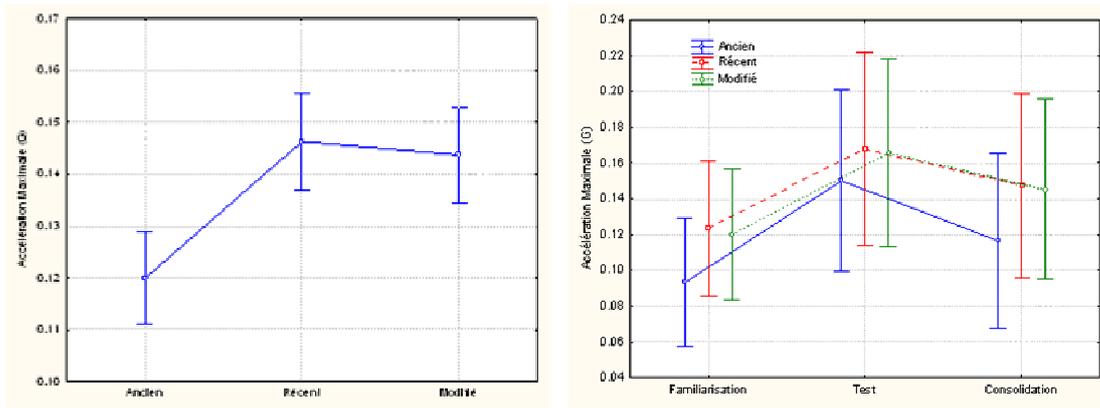


Figure 57 : Différence entre les 3 véhicules sur l'accélération maximale

| | | Vitesse au point de Corde | | |
|-----------------------|------------------|---------------------------|----------|---------------|
| | | Familiarisation | Test | Consolidation |
| Accélération maximale | Véhicule Ancien | Familiarisation | 0.108565 | |
| | | Test | | 0.071199 |
| | | Consolidation | | 0.409921 |
| | Véhicule Récent | Familiarisation | 0.454406 | |
| | | Test | | 0.233601 |
| | | Consolidation | | 0.342965 |
| | Véhicule Modifié | Familiarisation | 0.112244 | |
| | | Test | | 0.533326 |
| | | Consolidation | | 0.067188 |

Figure 58 : Corrélation entre l'accélération maximale et la vitesse au point de corde

| | | Corrélation Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|------------------|---|-----------------------|-----------|----------------|----------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d'alertes | -0.05457 | 0.890653 | 0.109347 | -0.21859 | 0.829733 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.73976 | 0.890653 | 0.109347 | 4.397565 | 0.000450 |
| Véhicule Récent | Nombre d'alertes | 0.10467 | 0.999573 | 0.000427 | 0.393805 | 0.699657 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.71833 | 0.999573 | 0.000427 | 3.863312 | 0.001722 |
| Véhicule Modifié | Nombre d'alertes | 0.17429 | 0.982817 | 0.017183 | 0.685551 | 0.503455 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.86667 | 0.982817 | 0.017183 | 6.728317 | 0.000007 |

Tableau 33 : Corrélations partielles

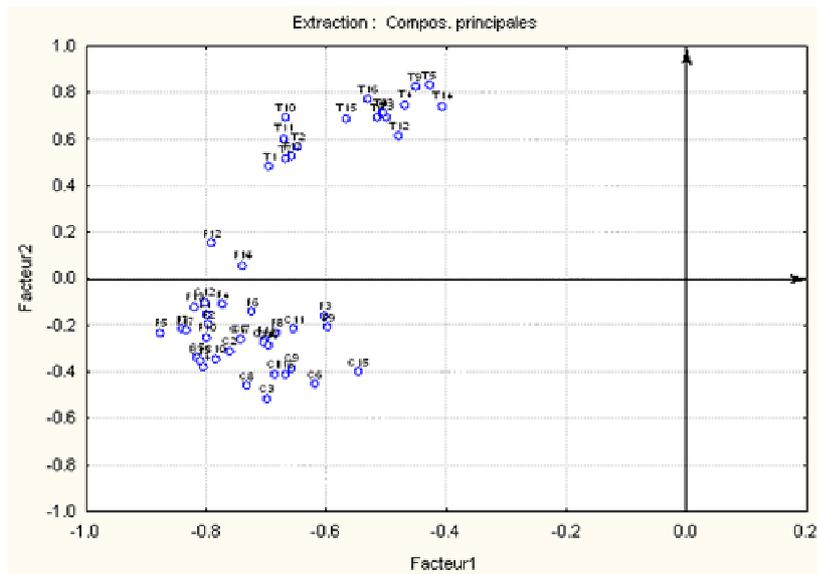


Figure 59 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et l’accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule *ancien*) par analyse en composantes principales

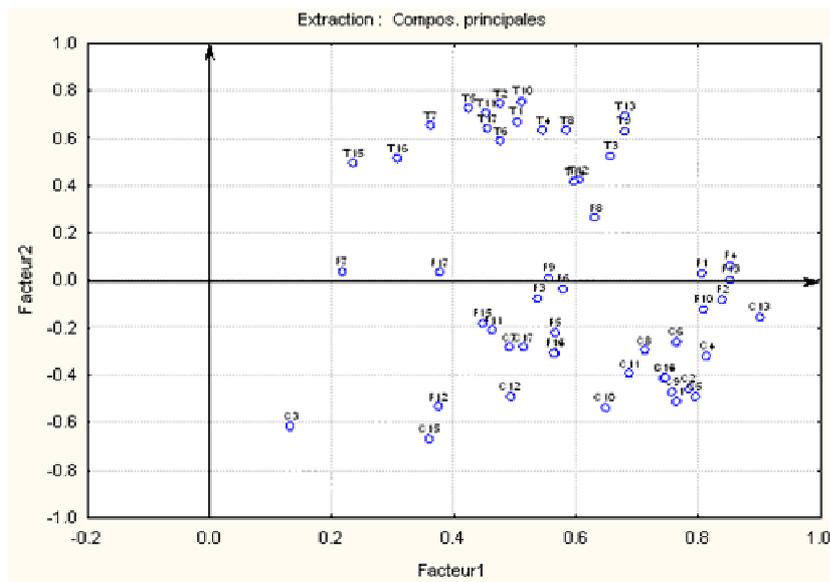


Figure 60 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et l’accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule *récent*) par analyse en composantes principales

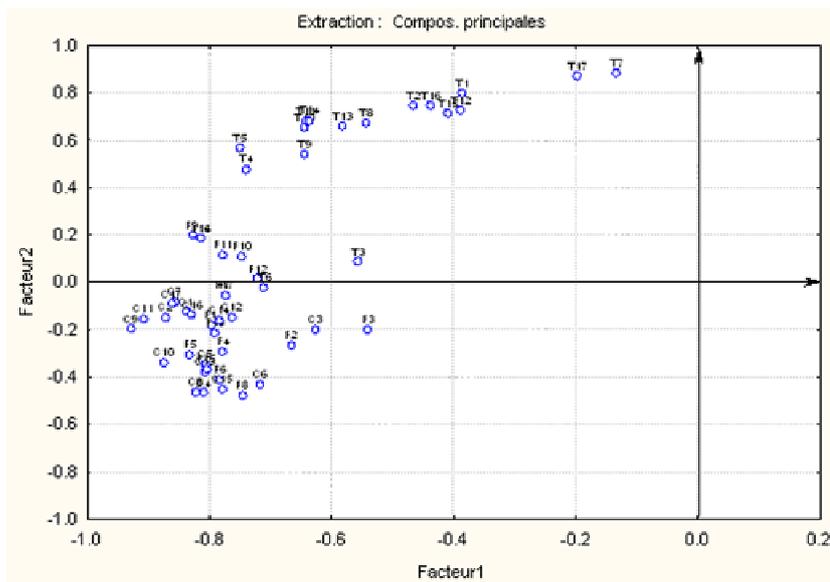


Figure 61 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et l’accélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véhicule *modifié*) par analyse en composantes principales

Décélération maximale

| | Test | Valeur | F | Effet | Erreur | p |
|---|------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Groupe | | | 3.2 | 2 | 51 | 0.047 |
| Lignes droites | Wilk | 0.011409 | 194.9608 | 16 | 36 | 0.000000 |
| Lignes droites x Groupe | Wilk | 0.266299 | 2.1101 | 32 | 72 | 0.004571 |
| Phases | Wilk | 0.218086 | 89.6335 | 2 | 50 | 0.000000 |
| Phases x Groupe | Wilk | 0.918796 | 1.0814 | 4 | 100 | 0.369870 |
| Lignes droites x Phase | Wilk | 0.076399 | 7.5557 | 32 | 20 | 0.000008 |
| Lignes droites x Phases x Groupe | Wilk | 0.126702 | 1.1309 | 64 | 40 | 0.342675 |

Tableau 34 : Tests multivariés pour mesures répétées (*Décélération maximale*)

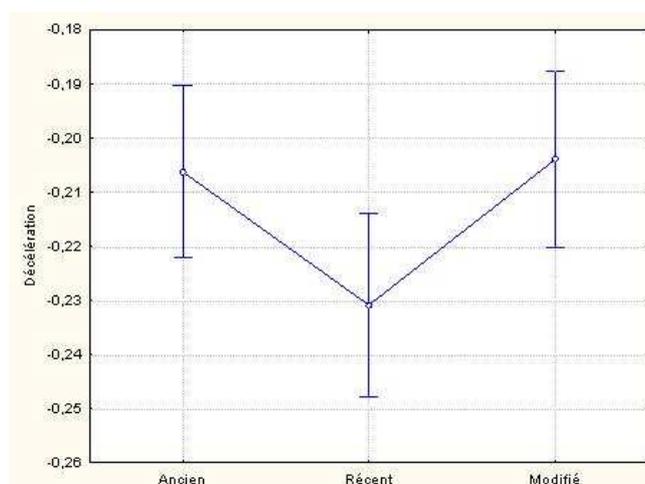


Figure 62 : Différence entre les 3 véhicules sur la décélération maximale

| | | Corrél Partielle | Tolérance | R ² | t(16) | Niveau p |
|-------------------------|---|------------------|-----------|----------------|-----------|----------|
| Véhicule Ancien | Nombre d'alertes | 0.358435 | 0.999957 | 0.000043 | 1.535783 | 0.144129 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.457636 | 0.999957 | 0.000043 | 2.058779 | 0.056180 |
| Véhicule Récent | Nombre d'alertes | -0.123062 | 0.784867 | 0.215133 | -0.463984 | 0.649792 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.692438 | 0.784867 | 0.215133 | 3.591053 | 0.002950 |
| Véhicule Modifié | Nombre d'alertes | -0.250383 | 0.975409 | 0.024591 | -1.00163 | 0.332405 |
| | Accélération maximale en lignes droites (Familiarisation) | 0.366823 | 0.975409 | 0.024591 | 1.52716 | 0.147531 |

Tableau 35 : Corrélations partielles

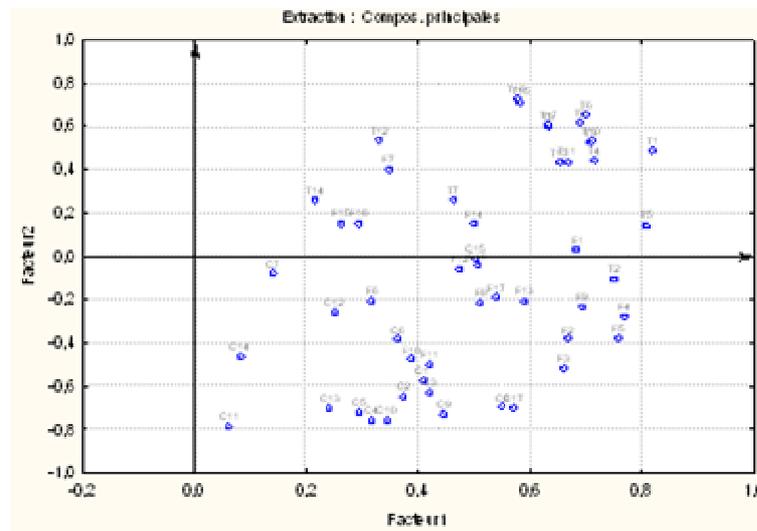


Figure 63 : Corrélations partielles entre le nombre d'alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. ancien) par analyse en composantes principales

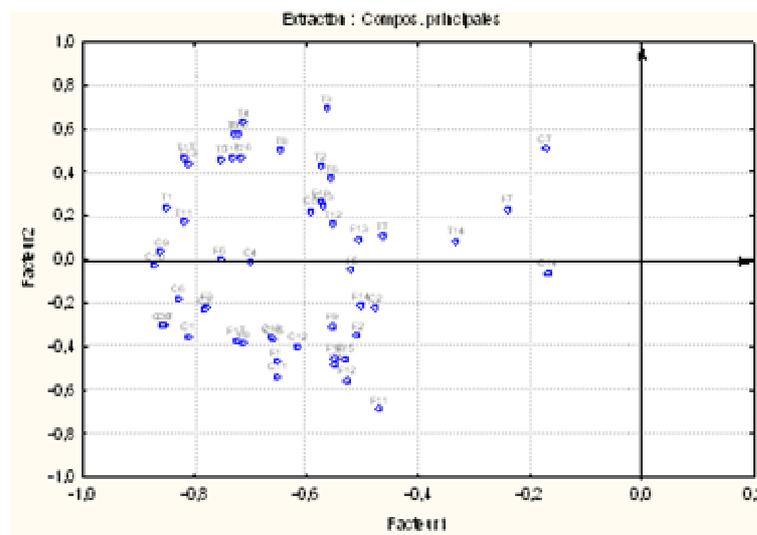


Figure 64 : Corrélations partielles entre le nombre d'alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. récent) par analyse en composantes principales

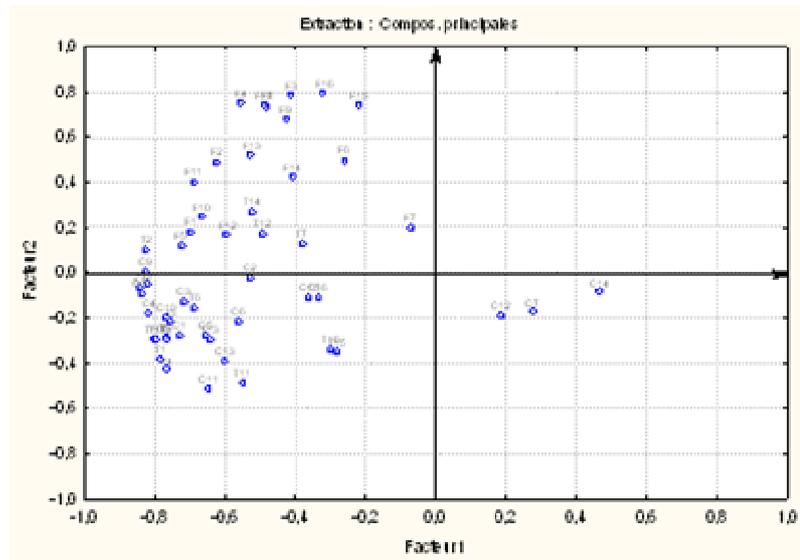


Figure 65 : Corrélations partielles entre le nombre d’alertes déclenchées (phase test) et la décélération maximale dans les lignes droites en phase de familiarisation (véh. *modifié*) par analyse en composantes principales



M.E.D.A.C

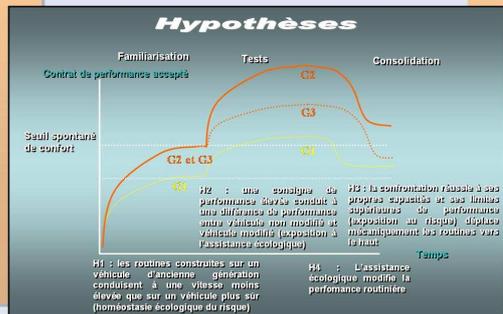
Méthodologie d' Evaluation de l'aDaptation comportementale aux Assistances de la Conduite

Mohamed KASSAAGI, Michèle MOESSINGER, Clément Val, Jean Marc BERSAC, Lionel BOULOMMIER, Olivier CHANTON, Jean François LYDIE, Annie PICOT, Franck MARS, Jean Marc BLOSSEVILLE, René AMALBERTI

La théorie homéostatique est un des plus anciennes théories expliquant la régulation des risques par le conducteur (Wilde, 82). Le conducteur ajusterait son comportement et sa performance pour s'adapter aux possibilités offertes par l'environnement en maintenant sa prise de risque à un niveau relativement constant. Cette théorie a été souvent reprise, débattue, mais jamais formellement prouvée. Le débat contradictoire s'est souvent déplacé vers les capacités importantes de régulation intentionnelle et motivationnelle du conducteur qui peuvent décider du niveau de performance volontairement choisi, et qui de fait échappe à ce mécanisme d'homéostasie. Le renouveau des travaux en psychologie cognitive naturelle, notamment sur le contrôle cognitif des routines, permet de reconsidérer l'hypothèse homéostatique (Amalberti, 96, 01). De nombreux travaux montrent que les routines s'appuient sur les réactions de l'environnement pour s'autoréguler (affordances)

Objectif
Etudier l'effet de la sollicitation, à un niveau pré-conscient, des canaux proprioceptifs et kinesthésiques des conducteurs par un système d'alerte naturelle agissant sur les routines de conduite dans le but d'obtenir une modification comportementale.

Sur un plan technique, la complexité de l'expérimentation tient au fait que la sensation à injecter doit être perçue et faire sens pour les routines, sans gêner le conducteur dans son appréciation de confort du véhicule (pas d'émergence consciente), et encore moins évidemment dégrader en quoi que ce soit les éléments de sécurité du véhicule.



Il s'agit typiquement de stimuli « naturels », dont on sait qu'ils sont utilisés spontanément au niveau psycho-physiologique sensoriel pour construire les sensations cognitives et le couplage à l'environnement

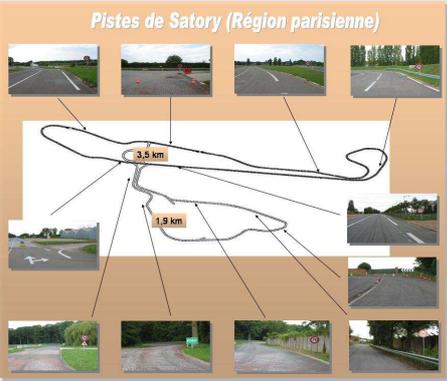
Partant du constat que les sorties de voie involontaires représentent plus de 40% des accidents impliquant au moins un véhicule léger et 70% des tués, ce projet s'est focalisé sur le contrôle transversal (ou négociation de virage).

Protocole

- 3 configurations de véhicules (« ancien », « récent », « récent+alertes »)
- 3 phases pour un même conducteur : familiarisation, test, consolidation
- Chaque conducteur conduit le même véhicule pendant les 3 phases

| Véhicules | Familiarisation | Test | Consolidation |
|--|--|------------------------|--|
| Groupes 1 ; N=10 1 « ancien » | Développer les routines sur le lieu expérimental | Contrat de performance | Mesure des références spontanées stabilisées |
| Groupes 2 ; N=17 2 « récent » | | | |
| Groupes 3 ; N=10 3 « récent+alertes » | | | |

- 4 rendez-vous au total
 - Recrutement : visite médicale et caractérisation du conducteur
 - Trois séances d'essais sur piste



Véhicules d'essais

MEGANE 1
Année 1998 – 55000 km
1,6 L – 8 s
Climatisation – ABS

MEGANE 2
Année 2004 – 3000 km
1,6 L - 16 s
Climatisation – ABS - ESP

Mesures

Mesures objectives

Action du conducteur
Course accélérateur et frein, angle et effort volant, embrayage, rapport de boîte

Dynamique véhicule
Vitesses et accélérations longitudinales et transversales, vitesse de lacet

Mesures subjectives
Exploitation des entretiens et des questionnaires
Expressions émotionnelles relevées sur la vidéo

Equipement des véhicules d'essais

MEGANE 1

- 4 voies vidéo
- 13 voies de mesures analogiques

MEGANE 2

- Idem Megane 1 +
- 20 voies de mesures can
- Alertes volant et siège

Systèmes d'alerte naturelle sur Mégane 2

Sensation de flou au volant, due à une chute brutale de l'effort ressenti combinée à la dégradation légère du confort par dégonflage des coussins dans les maintiens latéraux (assise/dossier du siège conducteur) intégrés dans le siège, amplifiant ainsi le ressenti de l'accélération latérale. Le système se déclenche uniquement lorsque le conducteur dépasse un certain seuil d'accélération latérale.



