



## Rapport de synthèse

---

### Février 2008

#### Rédacteur :

Franck Mars

Équipe PsyCoTec (Psychologie, Cognition, Technologie)

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)

UMR CNRS 6597 - Campus de l'École Centrale de Nantes

1, rue de la Noë - B.P. 92101

44321 Nantes Cedex 03

Téléphone : 02 40 37 69 19

Fax : 02 40 37 69 30 ou 68 01

E-Mail : [franck.mars@irc cyn.ec-nantes.fr](mailto:franck.mars@irc cyn.ec-nantes.fr)



<b>Résumé des travaux</b> .....	3
<b>Rappel des objectifs du projet</b> .....	5
<b>Projet 1 : Perception du point tangent et contrôle de la trajectoire</b> .....	7
Contexte et objectifs.....	7
Travaux réalisés.....	8
Expérience 1 : Manipulation du regard dans la région du point tangent.....	8
Expérience 2 : Utilisation spontanée d'un indicateur visuel pour le contrôle latéral.....	10
Expérience 3 : Stratégie point tangent en véhicule réel .....	11
Expérience 4 : Stratégie point tangent et coordination œil-tête .....	12
Synthèse des résultats.....	13
<b>Projet 2 : Implication du TLC dans le contrôle de la trajectoire et la perception du risque de sortie de voie</b> .....	14
Contexte et objectifs.....	14
Travaux réalisés.....	15
Expérience 1 : Zones visuelles d'intérêt pour la correction de trajectoire .....	15
Expérience 2 : Contrôle visuel de la trajectoire et Time to Lane Crossing.....	16
Synthèse des résultats.....	19
<b>Projet 3 : Implantation et validation des indicateurs de la conduite sur véhicule réel</b> ....	20
Contexte et objectifs.....	20
Travaux réalisés.....	20
Développement de la vérité terrain .....	21
Développement et évaluation des indicateurs fondés sur la vision .....	23
Synthèse des résultats.....	25
<b>Projet 4 : Elaboration de la fonction de risque et validation du référentiel commun</b> ....	26
Contexte et objectifs.....	26
Travaux réalisés.....	26
Descripteur de la conduite.....	27
Validation du référentiel commun et d'un descripteur du risque.....	28
Synthèse et perspectives.....	30
<b>Projet 5 : Coopération homme-machine appliquée au contrôle latéral du véhicule : contrôle mutuel et délégation de fonction</b> .....	31
Contexte et objectifs.....	31
Travaux réalisés.....	32
Expérience 1 - Contrôle mutuel : amorçage moteur et avertissement comme aides à la correction de trajectoire.....	32
Expérience 2 - Contrôle mutuel : performance et acceptabilité comparées de plusieurs modalités d'amorçage moteur et d'avertissement.....	34
Expérience 3 - La délégation du contrôle latéral : cas de la reprise en main en situation d'invalidité .....	35
Synthèse et perspectives.....	36
<b>Projet 6 : Développement d'un démonstrateur</b> .....	37
<b>Projet 7 : Développement des moyens de simulation</b> .....	38
Contexte et objectifs.....	38
Travaux réalisés.....	39
Développements pour le projet 1 .....	39
Développements pour le projet 2 .....	40
Développements pour le projet 5 .....	40
<b>Synthèse et conclusions</b> .....	42
<b>Liste des publications et communications</b> .....	44

# Résumé des travaux

---

Le projet PREVENSOR, dans la continuité du projet ARCOS et en lien avec le programme européen PReVENT, a conduit un ensemble de travaux dont l'objectif commun a été de contribuer à la conception ergonomique des assistances à la conduite pour la prévention des sorties de voie. Cet objectif a été poursuivi dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire entre des chercheurs en Sciences du Comportement (Équipe PsyCoTec de l'IRCCyN et Laboratoire "Mouvement & Perception") et en Automatique (LIVIC), avec un support scientifique et technique des constructeurs automobile (Renault et PSA). PREVENSOR propose un ensemble de six sous-projets articulés autour de l'élaboration d'une fonction de risque de sortie de voie. Le but est de réaliser le maintien d'un référentiel commun pour l'évaluation des risques de sortie de voie, condition nécessaire à une coopération satisfaisante entre dispositifs et conducteur.

Le projet 1 s'est intéressé aux relations fonctionnelles entre les stratégies d'exploration visuelle du conducteur et le contrôle de la trajectoire. L'accent a été mis sur l'utilisation du point tangent, connu pour être un point de fixation privilégié par les conducteurs et également discriminable dans la scène visuelle à l'aide de capteurs embarqués. Des expérimentations en simulateur et en véhicule réel ont permis d'identifier un modèle du contrôle visuel de la trajectoire pouvant fournir des éléments de prédiction utilisables dans le cadre de la conception des assistances à la conduite.

Dans le cadre du projet 2, différents travaux ont visé à estimer les indices visuels privilégiés lors du contrôle latéral de la trajectoire du véhicule. Deux paradigmes expérimentaux complémentaires ont été utilisés pour cela, cherchant à confronter l'utilisation du temps avant sortie de voie (TLC) avec celle de l'écart latéral ou du point tangent. Les analyses semblent indiquer que le TLC est un indicateur de la stratégie de positionnement latéral, mais n'est peut-être pas directement exploité par les conducteurs comme variable de commande.

Parallèlement aux deux projets précédents, un travail a été mené pour développer et valider sur véhicule réel des outils de mesure de l'angle au point de corde et du TLC. Une méthodologie de validation assurant la pertinence de l'indicateur a été développée. Ensuite, la validité des mesures issues d'un capteur fondé sur la vision a été déterminée. La première étape a consisté à développer différents algorithmes de calcul des deux indicateurs, évalués sur la base d'un positionnement du véhicule et des bords de voies avec une précision centimétrique. Les étapes suivantes ont été d'implanter ces algorithmes sur la base d'un capteur vision, puis de valider ces mesures par comparaison avec la vérité terrain.

L'objectif du projet 4 était d'établir et d'évaluer une fonction de risque commune entre le conducteur et un dispositif d'assistance au contrôle de la trajectoire en virage. La première partie du sujet a consisté au développement de critères de risque sur la base d'un ensemble d'indicateurs de la conduite, y compris ceux étudiés dans les projets 1 à 3. Des approches basées sur des indicateurs simples (évolution du TLC, prédiction de l'accélération latérale...) ou plus complexes (mariant plusieurs indicateurs, méthodes à dire d'experts...) ont été étudiées. Certaines ont été évaluées sur des données réelles. En outre, une analyse selon des modèles de

régression a suggéré que l'angle au point de corde pourrait être une variable de commande plus pertinente que les TLCs pour les corrections de trajectoires.

Le projet 5 a porté sur plusieurs modalités d'intervention d'assistances au contrôle latéral du véhicule. Les premiers travaux sur une assistance appelée "amorçage moteur" (vibration asymétrique du volant) ont mis en évidence une plus grande efficacité de ce type d'assistance lors de situations critiques, par comparaison à des dispositifs d'alerte plus classiques (stimulations auditives ou tactiles). En revanche, les résultats montrent des résultats contrastés entre efficacité et acceptabilité. L'intrusivité perçue des différentes modalités en serait une cause première. Une autre étude portant sur délégation du contrôle latéral à un automate a mis en évidence des difficultés de reprise en main lorsque le dispositif se trouvait en situation d'invalidité. Ces difficultés semblent liées à la décision de revenir en contrôle manuel, plutôt qu'à une négligence des informations visuelles qui sous-tendent le contrôle latéral.

Les résultats acquis dans PREVENSON ont permis le développement d'un prototype sur la base d'un véhicule de PSA. L'architecture matérielle a été calquée sur celle des véhicules du LIVIC, hormis pour la partie colonne de direction, développée spécialement par PSA. Plusieurs modes de partage de la conduite sont en cours d'intégration : avertissement, amorçage moteur et mode correctif. Le véhicule sera présenté lors du Carrefour PREDIT du 5 au 7 mai 2008.

La simulation de conduite permet de réaliser des expérimentations reproductibles, et ce sans risques pour les sujets. Ces qualités font que les simulateurs de conduite sont de plus en plus utilisés pour l'étude des comportements de conduite. Toutefois, la simulation de conduite est en soit un sujet de recherche. Les travaux de l'INRETS-MSIS, en permettant la réalisation d'une partie des expérimentations PREVENSON sur simulateur s'inscrivent dans cette démarche.

PREVENSON a ainsi approfondi la compréhension des problèmes liés à la coopération homme-machine et a permis le développement de nouveaux principes de conception centrés sur le conducteur. Si certains problèmes ont été identifier et résolus, il demeurent plusieurs questions restant à traiter pour s'approcher de dispositifs opérationnels efficaces dans des conditions réelles de conduite.

# Rappel des objectifs du projet

---

## **Annexes en rapport :**

- Annexe 1 : Projet PREVENSON initial (Franck Mars)
- Annexe 2 : Synthèse théorique (J.-M Hoc, M. Young & J.-M Blosseville)

Afin de répondre à la problématique des sorties de voies, et plus particulièrement celles dues à une erreur de guidage du véhicule, le projet PREVENSON proposait un ensemble de 6 projets articulés dont l'objectif général est de contribuer à la conception ergonomique des assistances à la conduite, en s'appuyant sur les acquis du programme ARCOS et en lien avec des travaux connexes réalisés dans le cadre du programme européen PREVENT.

Hoc et Blosseville (2003), puis Hoc, Young et Blosseville (Annexe 2, article sous presse), ont proposé un cadre théorique pour analyser les enjeux liés à la coopération homme-machine (CHM) en conduite automobile. L'objectif est d'identifier les questions liées au comportement du conducteur que soulève l'introduction de systèmes d'assistance automatisés dans les véhicules. Dans ce cadre conceptuel, le conducteur et le dispositif d'assistance sont considérés comme deux agents autonomes qui répondent à leurs propres objectifs, susceptibles d'interférer positivement (l'action d'un des agents favorise les objectifs du second) ou négativement (l'action d'un des agents gêne les objectifs du second). Au cœur de cette problématique, on trouve le concept de référentiel commun à l'automate et au conducteur, dont dépendent la qualité et l'efficacité de la coopération. Le référentiel commun n'implique pas seulement une compatibilité en termes de représentation de l'environnement, mais aussi en termes de représentation commune du fonctionnement du couple conducteur-assistance. Le maintien d'un bon référentiel commun s'avère indispensable afin d'assurer une mise en oeuvre de l'assistance adaptée à la situation de conduite.

La bonne mise en oeuvre des dispositifs réside dans un déclenchement au moment opportun et par une action adaptée à la situation. Sous-jacent à cette question, la question de l'estimation du risque de sortie de voie est cruciale. Quelles informations doivent-elles être prise en compte pour déterminer quand et comment faire intervenir l'assistance dans la tâche de conduite ? La réponse à cette question passe par la définition d'une fonction de risque qui déterminera la temporalité et la forme de l'intervention du système. Le risque de sortie de voie dépend de l'état dynamique du véhicule et du contrôle exercé par le conducteur. Le conducteur ne peut agir physiquement que sur l'accélérateur, les freins et l'angle au volant. Les trois degrés de liberté sur lesquels il agit permettent alors de déterminer les vitesses longitudinales et latérales du véhicule, la vitesse de rotation du véhicule, son accélération latérale et le braquage des roues. La mesure de ces différents paramètres peut être réalisée en temps réel et permet de caractériser la stabilité du véhicule. Des capteurs extéroceptifs peuvent également mesurer le positionnement et l'évolution du véhicule sur la voie. Ainsi, il est possible de disposer d'un ensemble d'indicateurs utiles pour définir une fonction de risque de sortie de voie : écart latéral, angle de cap, temps avant sortie de voie, direction du point de corde, adhérence mobilisable, etc. Cette évaluation objective du risque n'est néanmoins pas forcément en accord avec celle effectuée par le conducteur. Celui-ci utilise l'ensemble des informations sensorielles dont ils disposent (visuelles en grande partie, mais également vestibulaires et kinesthésiques) et apprend à pondérer ces informations pour maintenir son

véhicule dans une enveloppe de trajectoires jugées sûres. Déterminer entièrement la mise en œuvre des assistances sur la base de descripteurs objectifs sans prendre en compte les mécanismes qui sous-tendent le contrôle de la trajectoire par le conducteur mènerait inévitablement à un défaut de référentiel commun, qui se traduirait par un mauvais ressenti de l'action du dispositif, voire à des réactions inappropriées et dangereuses de la part du conducteur. La mise en œuvre des assistances à la conduite gagnerait donc à être déterminée par une fonction de risque dont les paramètres d'entrée soient signifiants pour le conducteur. De la même façon, l'assistance devra intervenir de sorte qu'elle s'insère efficacement dans les boucles perception-action qui sous-tendent le contrôle du véhicule par le conducteur. L'élaboration de modèles conducteurs pertinents et leur prise en compte pour la définition des fonctions de risque et des modalités d'action des assistances apparaissent être un but essentiel à atteindre.

Le coeur du projet repose donc sur l'élaboration d'une fonction de risque de sortie de voie basée sur un ensemble d'indicateurs de la conduite, spécifiés en fonction des modèles du conducteur et de la coopération homme-machine. Pour ce faire, plusieurs sous-projets opéraient en synergie dans PREVENSON. Les projets 1 et 2 visaient essentiellement une meilleure compréhension des mécanismes perceptifs qui déterminent le contrôle de la trajectoire par le conducteur. Le projet 1 s'est plus particulièrement penché sur la question des relations fonctionnelles existant entre les stratégies d'exploration visuelle du conducteur et le contrôle de la trajectoire, avec un accent particulier porté sur l'utilisation du point tangent en virage. Le projet 2 a porté sur l'implication du TLC (Time to Lane Crossing ou temps avant sortie de voie) dans le contrôle du véhicule et dans la perception du risque de sortie de voie. Parallèlement, le projet 3 a cherché à déterminer le domaine d'utilisation possible du TLC et de la direction du point tangent lorsque ces indicateurs seront estimés sur la base de capteurs embarqués dans un véhicule réel. Le projet 4 était en charge de l'élaboration de la fonction de risque, en prenant en compte les résultats obtenus dans les projets 1 à 3. Cette fonction de risque devait être validée par confrontation aux stratégies, essentiellement implicites, de gestion du risque par le conducteur. Le projet 5 a évalué deux grandes catégories de modes de coopération avec le conducteur : le mode contrôle mutuel (plus précisément les sous-modes avertissement et suggestion d'action) et un mode de délégation de fonction (le mode régulé). Le projet 6 a conclu la démarche de recherche par la mise au point d'un démonstrateur sur la base des résultats obtenus. Enfin, le projet 7 a fourni les outils de simulation nécessaires à la réalisation d'une partie des expérimentations.

Ce document de synthèse résume les réalisations issues de PREVENSON en conservant la structure initiale en sous-projets. A chaque section correspondent un ensemble d'annexes où est présentés en détails l'ensemble des résultats obtenus.

# Projet 1 : Perception du point tangent et contrôle de la trajectoire

---

## **Responsable :**

Franck Mars (IRCCyN)

## **Chercheurs impliqués :**

Daniel Mestre (Mouvement & Perception)

Benoit Lusetti (LIVIC)

Estelle Chin (PSA)

## **Annexes en rapport :**

- Annexe 3 : Projet 1 - Expérience 1 (Franck Mars)
- Annexe 4 : Projet 1 - Expérience 2 (Franck Mars)
- Annexe 5 : Projet 1 - Expérience 4 (Daniel Mestre)

## **Contexte et objectifs**

Land et Lee (1994) ont mis en évidence que les conducteurs regardent fréquemment un point particulier du bord intérieur de la route lors de la conduite en virage. Ce point, qu'ils nomment le point tangent (PT), correspond à ce qu'on appelle la « corde » en langage courant et correspond au point où la courbure de l'intérieur de la courbe s'inverse. Selon Land et Lee (1994), la direction du PT peut être utilisée pour estimer la courbure de la route, sans avoir à effectuer de jugement de distance absolue, de par la relation géométrique liant l'angle qui la sépare de la direction du déplacement au rayon de courbure du virage. Ainsi, regarder vers le point tangent pourrait fournir une lecture immédiate de la courbure de la route qui peut être utilisée directement comme entrée pour le système moteur qui contrôle la direction du véhicule (Land et Lee, 1994 ; Land, 1998, 2001).

Or le PT peut être isolé dans la scène visuelle à l'aide de capteurs vidéos embarqués et de méthodes de traitement d'image adaptées (cf. projet 3). Sa dynamique visuelle peut être envisagée comme un indicateur des changements de courbure de la route pour les automates embarqués et être utilisée comme tel dans les lois de commandes des assistances au contrôle latéral. L'enjeu dans ce cas est de faire en sorte que l'utilisation du PT par l'automate corresponde à celle faite par le conducteur. En d'autres mots, il convient de s'assurer que le contrôle visuel de la trajectoire du conducteur et de l'automate s'effectue en cohérence, participant ainsi au maintien d'un référentiel commun adéquat entre les deux agents. L'objectif principal des expérimentations menées dans le projet 1 est donc d'identifier un modèle de la stratégie « point tangent » qui rende compte du comportement de l'opérateur humain et qui puisse fournir des éléments de prédiction utilisables par l'automate.

Au delà de l'objectif principal, une problématique connexe a également été abordée, celle qui s'intéresse aux informations qu'il serait utile de mettre en évidence dans la scène visuelle

pour une aide au contrôle de la trajectoire en virage. En effet, la technologie des afficheurs tête haute (HUD, soit Head-Up Display selon la terminologie anglophone) permet de projeter sur le pare-brise des informations semi-transparentes qui se surimposent à la scène visuelle. De telles perspectives technologiques permettent d'envisager des assistances au contrôle de la trajectoire, en conduite de nuit ou lorsque la visibilité est dégradée, par exemple. La question se pose alors de savoir quelles sont les informations minimales les plus pertinentes à présenter au conducteur. Les expériences du projet 1 fournissent quelques éléments de réponse quant à savoir si la mise en évidence du PT dans la scène visuelle est pertinente.

## Travaux réalisés

### Expérience 1 : Manipulation du regard dans la région du point tangent

#### Objectif

Pour expliquer la nature de la stratégie « point tangent » utilisée par les conducteurs, plusieurs modèles explicatifs ont été proposés (Fig. 1). Selon Land (1998, 2001), c'est la relation géométrique existant entre l'angle au PT et la courbure de la route qui serait primordiale dans cette stratégie. Boer (1996) propose un modèle qui repose sur le calcul d'une trajectoire optimale à partir de la distance et de la direction d'un point cible, proche du point tangent mais situé sur la trajectoire à adopter. Selon ce modèle, la stratégie oculaire optimale n'est donc pas de regarder le PT, mais plutôt des points de contrôle le long de la trajectoire future. Salvucci et Gray (2004) proposent quant à eux un modèle, formalisé par un contrôleur à action proportionnelle intégrale, qui repose sur la perception de deux points distincts : un point proche (le centre de la voie à peu de distance du véhicule) et un point lointain, qui peut être le point de fuite en ligne droite, le point de corde en virage ou même un autre véhicule, selon les circonstances. Selon ce modèle, le PT est un bon candidat pour le contrôle visuel de la trajectoire, car il est saillant dans la scène visuelle, mais tout autre point qui évolue selon la géométrie de la route pourrait jouer le même rôle. L'expérience a consisté à manipuler l'orientation du regard des conducteurs par l'intermédiaire d'une tâche de suivi de cible afin de déterminer lequel de ces modèles prédit le mieux le comportement du conducteur.

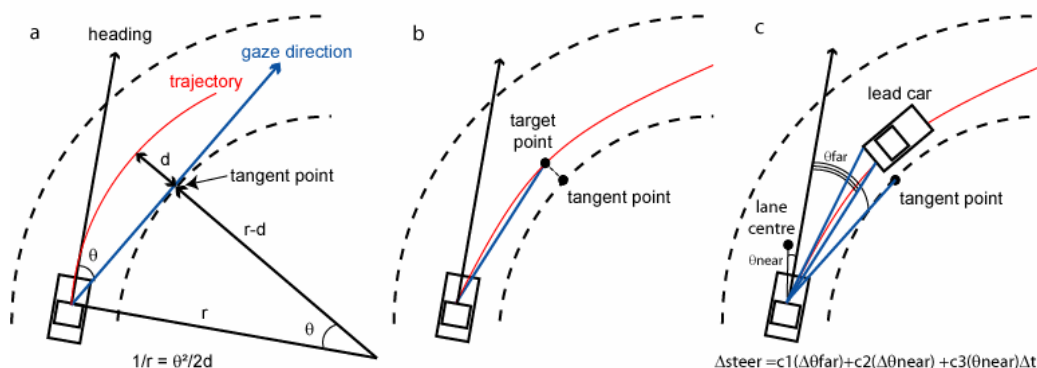


Figure 1: L'utilisation du PT selon (a) Land & Lee (1994), (b) Boer (1998) et (c) Salvucci & Gray (2004).

## Méthode

L'expérience a été conduite sur le simulateur Sim<sup>2</sup> (Sous-projet 7). L'expérience a consisté à demander au sujet de conduire en fixant un point cible situé sur le PT ou à proximité, sur la voie de circulation ou à l'intérieur du virage (Fig. 2). Les effets de l'orientation du regard sur plusieurs indicateurs de la conduite (vitesse, moyenne et variabilité de position latérale, nombre d'inversions au volant) ont été analysés et comparés à une condition contrôle où l'exploration de la scène visuelle était laissée libre.

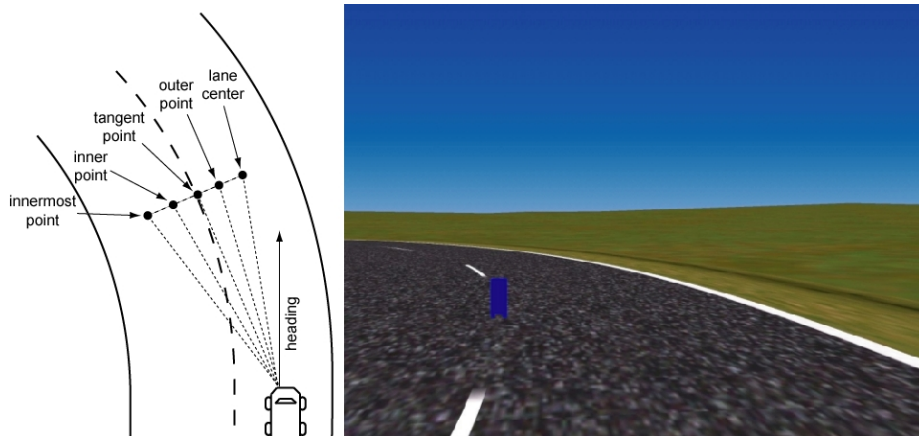


Figure 2: Gauche: Positions des 5 points de fixation. Droite: Image montrant la balise de fixation située sur le PT pendant un virage à gauche.

## Résultats

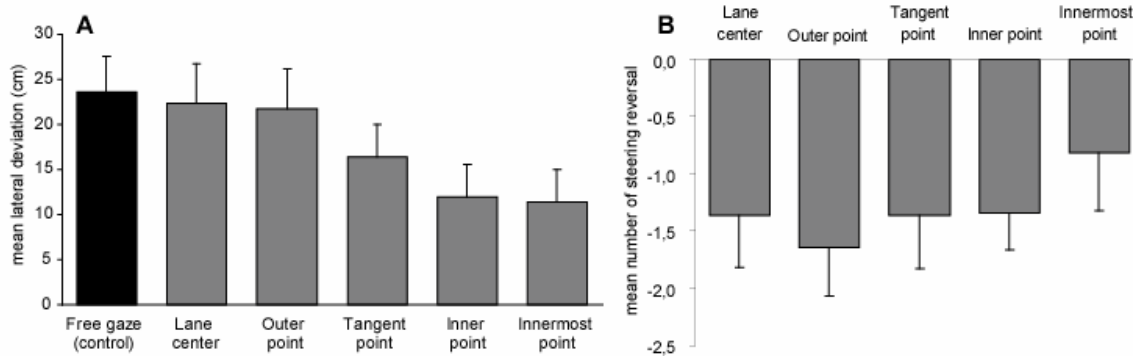


Figure 3: A : Ecart moyen de la trajectoire par rapport au centre de la voie. Une valeur positive représente un décalage vers l'intérieur du virage. B. Nombre d'inversions au volant comparé à la condition contrôle.

Les résultats ont montré que le suivi de la cible en amont du véhicule augmentait significativement la stabilité du contrôle latéral (Fig. 3B). Cette observation a été faite au niveau de la trajectoire (diminution de la variabilité de l'écart latéral) et au niveau de l'organe de commande (diminution du nombre d'oscillation du volant) et ceci quelle que soit la position latérale de la cible par rapport au point tangent. Ces résultats soutiennent l'idée que tout point décrivant les changements de courbure de la route en amont du véhicule est une bonne entrée pour le système moteur afin d'améliorer la stabilité du contrôle de la direction (Salvucci & Gray, 2004). De plus, nous avons observé une tendance des conducteurs à couper les virages dans la condition contrôle. Ce décalage de la position latérale moyenne se réduisait lorsque le PT ou un point encore plus à l'intérieur du virage était fixé, alors que la trajectoire

restait globalement inchangée lorsque le regard était dirigé vers le centre de la voie. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse que regarder le long de la trajectoire future détermine la trajectoire moyenne (Wann & Land 2000).

## Expérience 2 : Utilisation spontanée d'un indicateur visuel pour le contrôle latéral

### Objectif

Les résultats précédents semblent indiquer que faire figurer en HUD une cible visuelle décrivant les changements de courbure de la route pourrait constituer une aide au contrôle de la trajectoire, en particulier en termes d'augmentation de la stabilité du positionnement latéral dans la voie de circulation. Cependant, le suivi continu de la balise était imposé par consigne. La seconde expérience vise à déterminer si le conducteur peut et souhaite utiliser spontanément une telle référence visuelle en situation normale de conduite, et également lorsque le contrôle latéral est perturbé (forte bourrasque de vent simulée).

### Méthode

Le paradigme de l'expérience précédente a été reproduit, cette fois avec uniquement deux positionnements de la balise visuelle (centre voie et PT). Une condition où la balise était présente dans la scène visuelle mais sans consigne explicite de la regarder (*consigne faible*) a été ajoutée aux conditions *contrôle* (pas de cible) et de suivi obligatoire de la balise (*consigne forte*). De plus, durant chaque tour, deux perturbations latérales étaient générées en ligne droite et en entrée de virage, à des positions imprévisibles du circuit. Enfin, une analyse oculométrique a été réalisée.

### Résultats

Les analyses oculométriques montrent que la présence de la cible dans la condition consigne faible modifie les stratégies visuelles habituellement adoptées, mais dans des proportions relativement faibles (Fig. 4). Si le temps passé à regarder la cible est bien significativement supérieur à la condition *contrôle*, la taille de l'effet reste modeste et les stratégies anticipatrices (prise d'information en amont) sont préservées. D'un point de vue descriptif, le sens des effets observés sur le contrôle de la trajectoire est le même que celui observé dans la condition *instruction forte*, mais leurs amplitudes sont de moindre importance et n'ont pas de valeur significative.

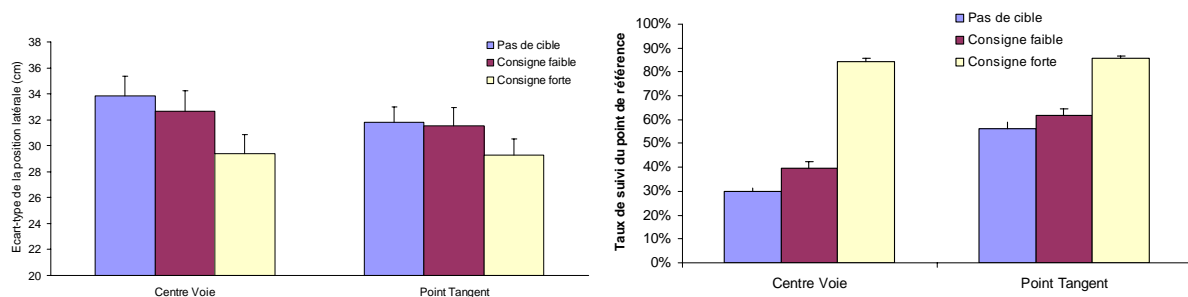


Figure 4 : Effet de la consigne et de la position de la cible visuelle sur la variabilité de l'écart latéral (gauche) et sur la proportion de temps passé à regarder à moins de 3° d'angle du point de référence (centre voie ou PT).

Les résultats observés suite aux perturbations latérales montrent que le contrôle du véhicule n'a été que très marginalement influencé par l'ajout de la cible dans la scène visuelle, quelle que soit sa position et la consigne de suivi qui était donné aux sujets. Aucune des différences observées n'étaient significatives (Fig. 5).

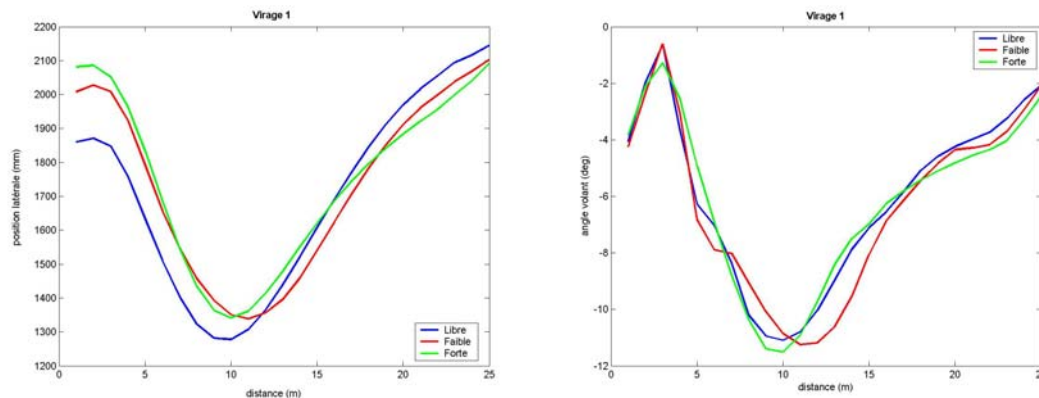


Figure 5 : Effet moyen de la consigne sur la position latérale (gauche) et l'angle au volant (droite) lors des perturbations de trajectoire dans un virage donné.

### Expérience 3 : Stratégie point tangent en véhicule réel

#### Objectif

Dans le cadre d'une collaboration IRCCyN/LIVIC/PSA, une expérimentation a été réalisée sur piste avec un véhicule équipé des moyens de perception de la route développés dans le projet 3 et d'un dispositif de mesure des mouvements oculaires. L'objectif, outre la réalisation d'un défi technique ambitieux, était double. Il s'agissait tout d'abord de valider en situation réelle les observations faites dans les expériences en simulateur, en particulier sur la nature de la stratégie « point tangent » adoptée spontanément par les conducteurs, sur l'évolution de cette stratégie avec la familiarité au parcours et sur les transition entre contrôle à moyen terme (PT) et prises d'information plus anticipatrices.

#### Méthode

L'expérience a été réalisée à l'aide du véhicule VIPER du LIVIC, équipé en perception vidéo de la scène avant, d'un GPS centimétrique et d'un oculomètre de type ETS-PC II. L'acquisition de la position du regard et du PT dans la scène visuelle était réalisée dans le même référentiel caméra, et ceci de façon synchronisée avec les paramètres véhicules. Six tours de la piste de Satory ont été réalisés pour chacun des 10 sujets.

#### Résultats

L'expérience s'étant déroulée relativement tard au cours du projet, l'analyse des données est encore inachevée. Les premiers résultats semblent montrer que le recours au PT semble plus important en début et en fin de virage, conformément aux observations faites en simulateur (Fig. 6). Il n'est cependant pas possible à la date de rédaction de ce rapport de tirer des conclusions sur les hypothèses posées.

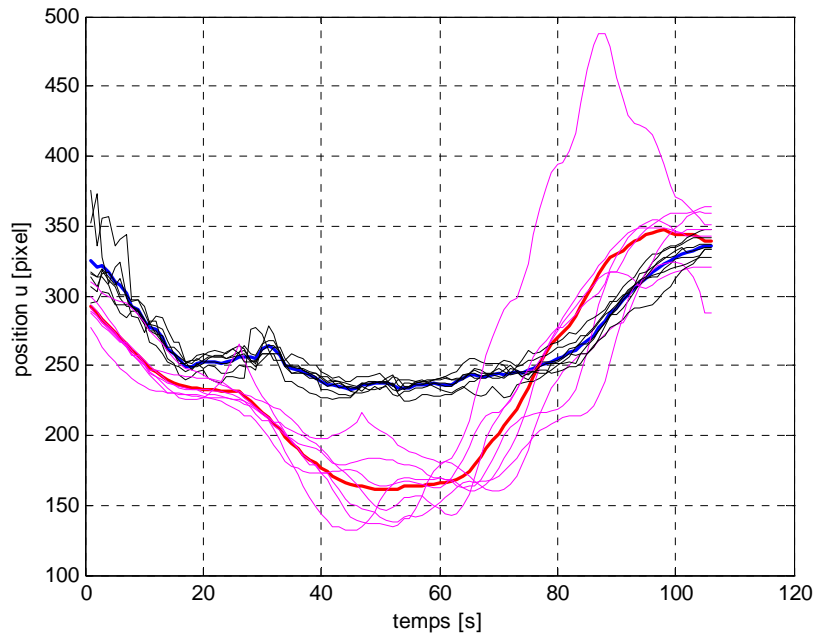


Figure 6 : Exemple d'acquisition des positions du regard (en rouge) et du PT (en noir) dans la scène visuelle pour un sujet donné et un virage donné.

## Expérience 4 : Stratégie point tangent et coordination œil-tête

### Objectif

L'expérience 4 a analysée les coordinations entre les mouvements de la tête, la dynamique du PT et le contrôle de la trajectoire. Elle a visé en particulier à montrer que l'orientation de la tête (qui s'incline dans le sens du virage) est réglée par un système de coordonnées visuelles proactif (le sujet place son système de coordonnées en alignement avec la sortie du virage). Il s'agit de comprendre en quoi ces mouvements posturaux contribuent aux prises d'information visuelle et de les prendre en compte dans le cadre de la définition d'aides à la prise de virage.

### Méthode

L'expérience a été conduite sur le simulateur Sim<sup>2</sup> qui fournissait la position du PT dans la scène visuelle (Sous-projet 7). Les mouvements de la tête pendant la négociation d'une série de virages de courbures variées étaient mesurés à l'aide d'un capteur électromagnétique.

### Résultats

Les analyses ont montré que les mouvements de la tête étaient toujours orientés dans le sens du virage et linéairement corrélés avec la courbure de la route, en roulis et en lacet. La position horizontale du PT a elle aussi été analysée. La figure 7 montre la similarité des patterns entre l'orientation de la tête en lacet et l'angle au PT. Les présents résultats ont été obtenus avec un simulateur à base fixe, ils suggèrent une origine visuelle aux réorientations de la tête, contrairement à l'hypothèse d'une origine visuo-vestibulaire à de tels mouvements (le conducteur alignant sa tête avec le vecteur gravito-inertiel).

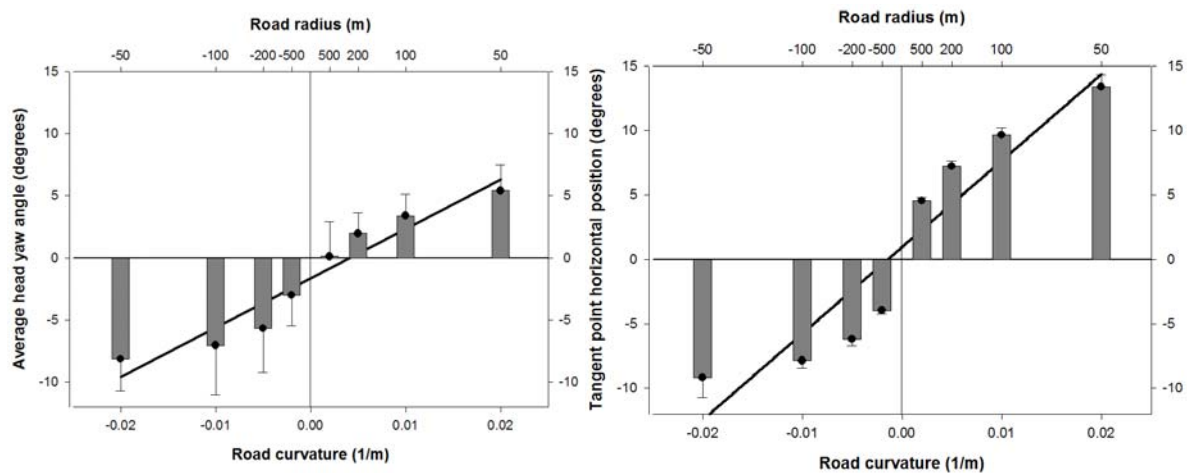


Figure 7 : Valeurs moyennes de l'angle de lacet de la tête (gauche) et de la position angulaire du PT (droite) en fonction de la courbure de la route.

## Synthèse des résultats

Le projet 1 a confirmé que regarder dans la région du PT en cours de négociation de virages est une stratégie visuelle spontanément adoptée par les conducteurs. Il a même été montré qu'il est possible pour le conducteur de contrôler son véhicule sans perte de performance en s'appuyant uniquement sur cette stratégie, alors que des prises d'informations plus anticipatrices alternent habituellement avec la stratégie « point tangent ». Les résultats suggèrent également que renforcer le couplage entre le contrôle du regard et le contrôle du volant par le biais du suivi d'une balise visuelle ayant les propriétés dynamiques du PT peut améliorer sensiblement la stabilité du contrôle de la trajectoire. Ceci plaide globalement pour l'idée selon laquelle utiliser les changements de direction du PT comme indicateur prédictif de des trajectoires futures est pertinent. Le modèle de contrôle proportionnel-intégral de Salvucci & Gray (2004) semble le plus adapté pour prédire les actions au volant et ainsi alimenter une fonction de risque de sortie de voie.

Un objectif connexe était de définir dans quelle mesure la mesure du PT dans la scène visuelle peut être considérée comme une aide au contrôle de la trajectoire. Il a été montré que, dans des conditions normales de conduite où l'ensemble de la scène visuelle est disponible, les conducteurs ne semblent pas tirer spontanément avantage de la présence d'une telle balise. Aucun bénéfice n'a été observé non plus en situation critique d'instabilité latérale du véhicule. La question reste ouverte de savoir si ces bénéfices attendus apparaîtront lorsqu'une aide à la conduite de ce type sera mise en œuvre dans des conditions de visibilité réduite. Enfin, l'application de ce principe à un affichage tête haute sur le pare-brise du véhicule impliquera de prendre en compte les mouvements de la tête du conducteur. Le projet 1 semble indiquer que la dynamique du PT pourrait également servir à prédire ces mouvements.

# Projet 2 : Implication du TLC dans le contrôle de la trajectoire et la perception du risque de sortie de voie

---

## Responsable :

Isabelle Milleville (IRCCyN)

## Chercheurs impliqués :

Cécile Coutton-Jean (Mouvement & Perception)

Reinoud Bootsma (Mouvement & Perception)

Daniel Mestre (Mouvement & Perception)

## Annexes en rapport :

- Annexe 6 : Projet 2 - Expérience 1 (Isabelle Milleville)

- Annexe 7 : Projet 2 - Expérience 2 (C. Coutton-Jean, D. Mestre et R. Bootsma)

## Contexte et objectifs

Un problème majeur rencontré dans la mise en place de dispositifs d'assistance à la conduite consiste à déterminer le moment où ces dispositifs doivent agir afin d'éviter l'accident. Un dispositif intervenant trop précocement dans le processus de conduite peut entraîner un sentiment de perte d'implication dans la conduite de la part du conducteur ou des réactions inadaptées, ce qui serait dangereux. Il est donc important de définir précisément quelles sont les capacités et les limites perceptives du conducteur, afin d'ajuster les dispositifs d'aide sur le fonctionnement de ce dernier. Parmi les différentes informations sensorielles utilisées par le conducteur (visuelles, vestibulaires, tactiles, auditives), les informations visuelles sont celles sur lesquelles le conducteur s'appuie le plus. La vision est, en effet, utilisée pour effectuer des régulations sensori-motrices en cours d'action. Les travaux effectués dans le sous-projet 1 sur le point tangent ont permis d'établir un lien entre les stratégies de prise d'information visuelle et le contrôle de la trajectoire du véhicule. Mais la vision est également impliquée dans l'anticipation du devenir du véhicule. Par exemple, le conducteur dispose visuellement d'une information temporelle sur l'évolution du véhicule, le TLC (Time to Lane Crossing), qui correspond au temps nécessaire pour que le véhicule atteigne l'une ou l'autre des bordures de la voie, en supposant que le conducteur n'apporte aucune correction à sa trajectoire. Les travaux de van Winsum (1996) et van Winsum, de Waard et Brookhuis (1999) indiquent que, lors d'un changement de voie, les conducteurs régulent leur conduite en fonction de l'évolution de ce paramètre. Ainsi, le conducteur semble capable d'intégrer continuellement des informations temporelles concernant les risques de sortie de voie. Néanmoins, pour une courbure, une vitesse et une dérive données, d'autres types d'informations peuvent être utiles au conducteur afin de détecter un risque de sortie de voie. On peut citer notamment, l'écart latéral par rapport à la voie ou encore l'évolution de la position du point de corde. Le moment où le conducteur va détecter le risque de sortie, et va donc réagir en fonction de ce risque, sera différent selon qu'il utilise l'un ou l'autre de ces paramètres.

L'objectif de ce projet était de définir plus précisément l'implication respective de ces indices dans la détection du risque de sortie de voie et ce afin d'adapter la temporalité de la présentation d'une assistance à la conduite au mode de fonctionnement du conducteur. Le but est, à terme, de définir si le TLC est simplement corrélé au comportement de conduite ou s'il est réellement utilisé par le conducteur. L'utilisation du TLC peut dans le cas présent se manifester de deux façons : soit le TLC est utilisé afin de définir un seuil de risque au-delà duquel il faut corriger la trajectoire mais n'intervient pas directement dans la gestion de cette dernière, soit il est utilisé directement pour la gestion de la trajectoire au même titre que le point tangent.

Par ailleurs les travaux de van Winsum, Brookhuis et de Waard (2000) ont montré que le TLC pouvait être approximé de différentes façons. Par exemple, en calculant le rapport entre l'écart latéral au bord de voie et la vitesse latérale ou la vitesse latérale plus sa dérivée. On peut également calculer le TLC en fonction de la vitesse et du cap du véhicule ou bien en intégrant également l'angle des roues ou encore, en fonction de la vitesse, du cap du véhicule et selon un certain nombre de directions arbitraires (ceci afin de définir une enveloppe de sécurité autour de véhicule). La faisabilité de l'implémentation sur véhicule réels de ces différents modes de calculs du TLC (afin de réguler le fonctionnement des assistances à la conduite) ainsi que l'étude de leur fiabilité est l'objet du projet 3. Notre objectif est de définir quel mode de calcul du TLC se rapproche le plus de ce qui est utilisé par les conducteurs. Ceci, de façon à faciliter l'instauration d'un référentiel commun entre le conducteur et le véhicule « intelligent ».

## Travaux réalisés

### *Expérience 1 : Zones visuelles d'intérêt pour la correction de trajectoire*

#### **Objectif**

Une première étude a consisté à définir si les conducteurs utilisent effectivement le TLC pour définir un seuil de risque lié à la trajectoire du véhicule. Les participants avaient à visionner une simulation de déplacement à bord d'un véhicule selon une trajectoire précise dans un virage donné. L'objectif était de définir à partir de quel moment les conducteurs sont capables de déterminer un risque lié à une déviation de trajectoire nécessitant une correction et si le TLC est effectivement une variable déterminante pour ce diagnostic.

#### **Méthode**

Le simulateur de conduite Sim<sup>2</sup> (Sous-projet 7) a été utilisé. L'environnement routier était une modélisation de la piste d'essai de Satory. Les participants devaient visionner des simulations de trajectoires de véhicules présentées du point de vue du conducteur. Dans certains cas, une dérive pouvait être introduite dans la trajectoire. Les participants ne pouvaient pas réellement conduire le simulateur afin d'éviter toute interférence avec les dérives, mais ils avaient pour consigne de tenir le volant et de le tourner exactement comme si ils conduisaient. Par ailleurs, les participants avaient également pour consigne de maintenir le pied droit posé sur la pédale de frein et de freiner dès qu'ils ressentaient le besoin de corriger la trajectoire du véhicule. L'action sur la pédale de frein avait pour effet de ramener le véhicule au centre de la voie à l'endroit où la dérive avait commencé.

## Résultats

Les données obtenues indiquent que le TLC varie selon l'importance de la dérive (Fig. 8) et est plus grand pour les dérives faibles (5mm/m) que pour les dérives plus importantes (7.5mm/m et 10mm/m). Cette influence de la dérive du véhicule sur l'évolution du TLC se traduit par une corrélation négative entre le TLC et la vitesse latérale du véhicule ( $R=0.90$ ). Le TLC augmente de façon exponentielle avec la diminution de la vitesse latérale (Fig. 8).

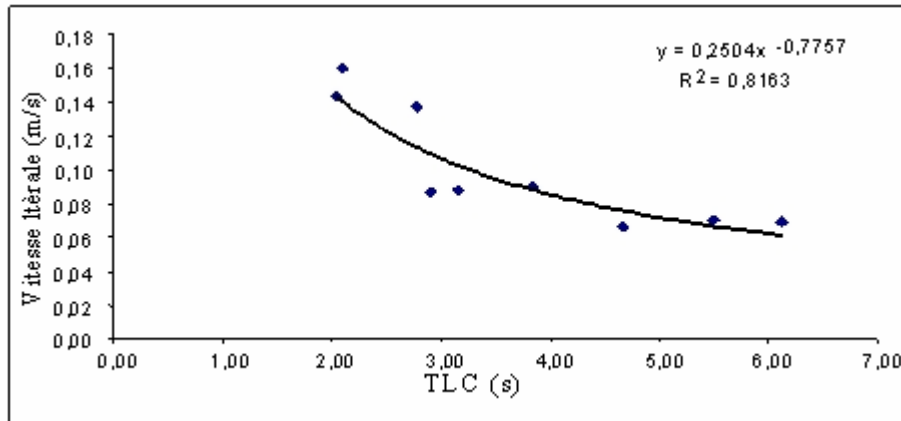


Figure 8 : Corrélation entre le TLC et la vitesse latérale du véhicule.

L'analyse des mouvements oculaires indique que le conducteur regarde la majeure partie du temps loin devant lui à l'intersection entre la direction de son déplacement et la limite extérieure de la route (Fig. 9a). Juste avant de corriger la trajectoire du véhicule, le conducteur effectue ensuite un mouvement oculaire de contrôle le long de la limite extérieure de la route en direction de la partie avant du véhicule (Fig. 9b-d).



Figure 9 : Position du regard sur la route juste avant que le conducteur ne décide de corriger sa trajectoire. a) le conducteur regarde loin devant à l'intersection entre la direction de son déplacement et la partie extérieure de la route. b) à d) mouvement oculaire de contrôle le long de la limite extérieure de la route en direction du véhicule.

## Expérience 2 : Contrôle visuel de la trajectoire et Time to Lane Crossing

### Objectif

Une deuxième étude a visé à mettre en évidence l'utilisation du TLC en continu lors de la conduite. Ainsi, contrairement à l'étude 1, l'objectif de cette étude n'était pas de vérifier l'utilisation du TLC en tant qu'indice de risque, mais son utilisation directe par le conducteur lors de la régulation du positionnement sur la voie. Les résultats de l'étude 1 ainsi que les données de la littérature ne nous permettent pas en effet de déterminer si le TLC est un simple indice de risque corrélé à la performance de conduite ou s'il est effectivement directement utilisé par les conducteurs pour réguler leur trajectoire. La réponse à cette question est

importante, car elle sera déterminante dans le choix des informations retranscrites au conducteur afin de l'assister. Le TLC est un indice qui se réfère essentiellement aux lignes de bord de voie. Afin de déterminer si les conducteurs utilisent le TLC ponctuellement comme un seuil de risque ou en continu tout au long d'une prise de virage, nous avons manipulé les caractéristiques de la route lors du passage du conducteur.

### **Méthode**

Afin de réaliser cette étude, un autre simulateur de conduite a dû être développé et utilisé au laboratoire « Mouvement & Perception » (ICE développé par C. Goulon). En effet, le protocole expérimental impliquait des développements non initialement prévus dans le cadre du sous-projet 7. L'expérimentation consista à faire varier la largeur de la route par un déplacement des lignes de bords de voie à chaque entrée de virage (3 premières secondes). Le déplacement de la ligne intérieure ou extérieure, ou des deux lignes en même temps, avait comme finalité d'accentuer ou non le risque de sortie de voie. Les conducteurs ont réalisé plusieurs virages de rayons de courbure différents (75, 150, 300 et 500 m) dans deux sessions de largeurs de voie initiales distinctes : 3 m 80, dans le cas où la largeur de voie s'agrandissait et 7 m 60, dans le cas où la largeur de voie rétrécissait.

### **Résultats**

Quelle que soit la largeur de la voie, pour des rayons de courbure égal à 150 m, 300 m et 500 m, la position des conducteurs l'intérieure de la voie est, d'une part identique entre la condition « contrôle » et la condition « ligne extérieure », et d'autre part, significativement différente entre la condition « contrôle » et les conditions « ligne intérieure » et « 2 lignes ». Ces résultats mettent en avant le fait que les conducteurs ne réagissent qu'au déplacement de la ligne intérieure, quel qu'il soit (Fig. 10). Les conducteurs semblent donc prélever des informations par rapport à la ligne intérieure de la voie. C'est pourquoi nous avons analysé seulement les données des différents TLC calculés par rapport à la ligne intérieure.

Les résultats de TLC1 (écart latéral/vitesse latérale) montrent à la fois un effet d'interaction entre les conditions et la largeur de voie et un effet d'interaction entre les rayons de courbure et la largeur de voie. Au début (les 1,5 premières secondes) et après la perturbation (de 3 à 4,5s), les valeurs de TLC1 dans les conditions « ligne intérieure » et « 2 lignes » sont significativement différentes des valeurs de TLC1 obtenues dans la condition « contrôle ». A partir de 4.5 s, les conducteurs maintiennent un TLC1 constant et équivalent quelle que soit la condition de déplacement ou non de lignes et la largeur de voie (Fig. 11). Par contre, plus le rayon de courbure est grand, plus le TLC1 est grand. Nous obtenons les mêmes différences pour les données de TLC2 (rapport entre l'écart latéral et la somme de la vitesse et de l'accélération latérales) et de TLC trigonométrique (calculé en prenant en compte l'angle au volant).

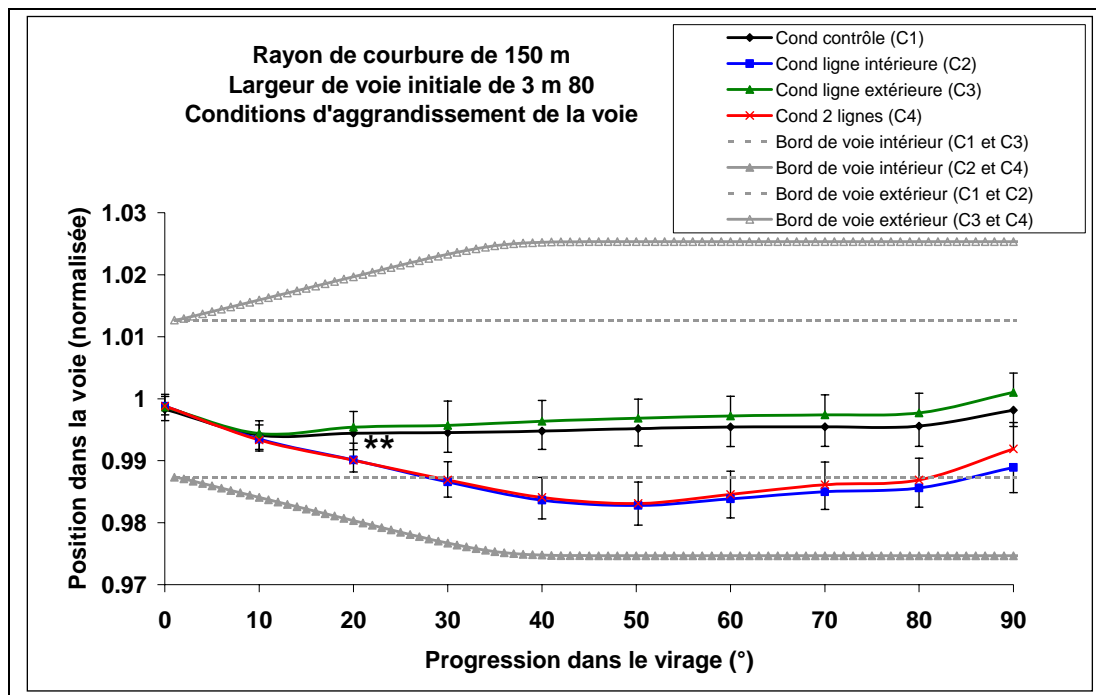


Figure 10 : Les lignes de couleurs représentent la position normalisée des conducteurs à l'intérieur de la voie en fonction des différentes conditions d'agrandissement de largeur de voie, au cours d'un virage de rayon de courbure égal à 150 m. Les lignes grises représentent la position des lignes de bords de voie (discontinues pour la largeur de voie initiale égale à 3 m 80 et continues pour la largeur de voie s'agrandissant jusqu'à 7 m 60) : les deux du bas représentent la ligne de bord de voie intérieure et les deux du haut représentent la ligne de bord de voie extérieure. La valeur 1 correspond au centre de la voie.

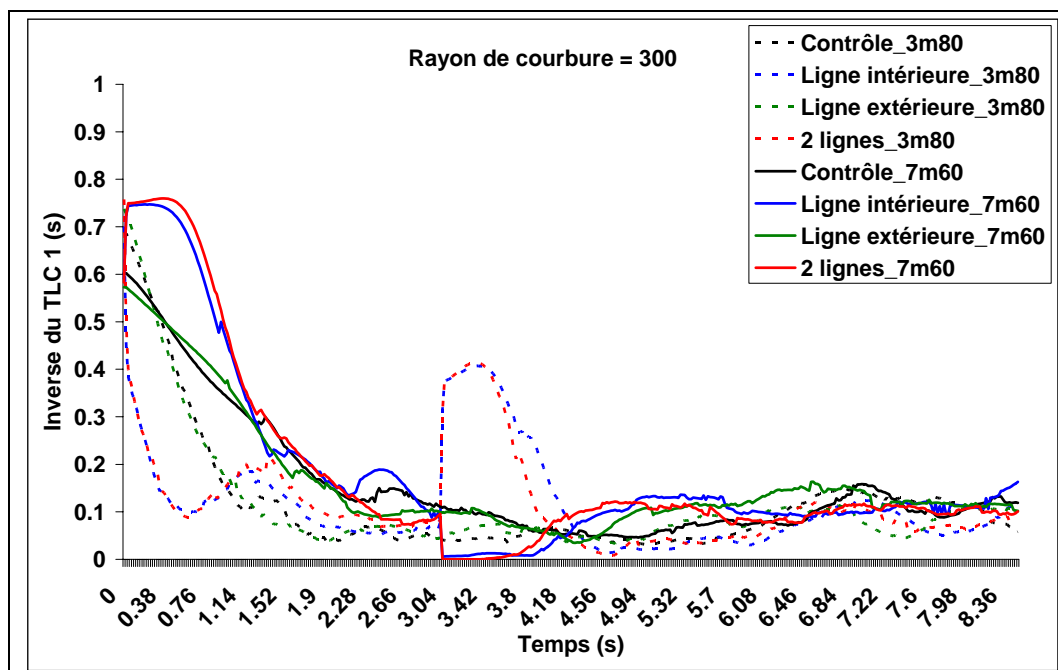


Figure 11 : Evolution de l'inverse du TLC 1 intérieur sur une période de 0 à 8.5 s dans un virage de rayon de courbure égal à 300 m (quand l'inverse du TLC tend vers 0, cela signifie que le TLC tend vers l'infini). Les lignes discontinues représentent les différentes conditions de déplacement ou non de lignes dans le cas où la largeur de voie initiale est de 3 m 80 (et de 7 m 60 à la fin de la perturbation) tandis que les lignes continues les différentes conditions de déplacement ou non de lignes dans le cas où la largeur de voie initiale est de 7 m 60 (et de 3 m 80 à la fin de la perturbation).

Dès l'entrée dans le virage, les conducteurs semblent augmenter leur TLC jusqu'à atteindre les valeurs obtenues en condition « contrôle », indépendamment de la largeur de voie. Cependant une fois le déplacement de la ligne terminé (3 s), le TLC augmente (arrêt de la réduction de la largeur de voie) ou diminue (arrêt de l'agrandissement de la largeur de voie) fortement. Or, dans les deux cas, les conducteurs ramènent leur TLC autour des valeurs obtenues en condition « contrôle ». On pourrait alors penser que les conducteurs cherchent à maintenir une valeur confortable de TLC intérieur pour contrôler leur trajectoire. Cependant cette valeur est différente selon les rayons de courbure, donc le TLC ne constitue pas un indice pertinent pour un contrôle de trajectoire courbe en continu. De plus, à chaque fois que la perturbation s'arrête dans le cas où la largeur de voie s'est agrandie, le TLC diminue brutalement. Plutôt qu'attendre d'atteindre une valeur seuil de TLC (Van Winsum et Godthelp, 1996), les conducteurs corrigent leur trajectoire à différentes valeurs de TLC selon le rayon de courbure.

## **Synthèse des résultats**

Les résultats du projet 2 semble montrer que si le TLC est un indicateur du positionnement latéral du véhicule, il n'est peut-être pas directement exploité par les conducteurs comme variable de contrôle. En effet, l'analyse des stratégies visuelles indiquent que les conducteurs ne semblent pas accorder une attention particulière à la zone visuelle correspondant à l'endroit où le TLC est calculé. De plus, quel que soit le mode de calcul du TLC considéré (latéral ou trigonométrique), celui-ci ne semble pas constituer un indice utilisé pour contrôler en continu la trajectoire en virage. En effet, il n'existe pas un seuil de sécurité temporel en deçà duquel les conducteurs corrigeraient leur trajectoire. Les conducteurs semblent plutôt chercher à continuellement annuler leur vitesse latérale par rapport au bord intérieur de la route. Dans ces conditions, il apparaît difficile de proposer des recommandations sur l'utilisation du TLC pour le déclenchement des assistances.

# Projet 3 : Implantation et validation des indicateurs de la conduite sur véhicule réel

---

## Responsable :

Sébastien Glaser (LIVIC)

## Chercheurs impliqués :

Jérôme Douret (LIVIC)  
Raphaël Labayrade (LIVIC)  
Romain Gallen (LIVIC)  
Saïd Mammar (LIVIC)  
Benoit Lusetti (LIVIC)

## Annexes en rapport :

- Annexe 8 - Projet 3 - Synthèse et publications (Sébastien Glaser)

## Contexte et objectifs

Sur la base des projets 1 et 2, nous avons cherché à estimer la validité des différents indicateurs de la conduite (TLC et direction du point tangent) lorsque ceux-ci sont estimés sur la base de capteurs embarqués dans un véhicule réel. En effet, du fait des imprécisions des capteurs utilisés, du bruit sur les mesures, et de la portée de ceux-ci, il est vraisemblable que les indicateurs estimés sur véhicule réel ne soient qu'une approximation par rapport à ceux implantés sur simulateur. De même, la fréquence, la durée d'acquisition et le temps de calcul nécessaire à l'estimation des indicateurs ajoute à cette approximation. Il convient donc de s'assurer que leurs domaines de validité (latence, précision, variabilité et portée) restent en adéquation avec les résultats obtenus sur simulateur par les deux projets précédents, notamment autour des valeurs ayant été identifiées comme critiques pour le conducteur. Cette étude devrait donc nous permettre de conclure sur la précision et les plages d'utilisation de ces indicateurs pour le développement d'assistances pour la prévention des sorties de voie.

## Travaux réalisés

Pour ce faire, l'étude a été réalisée en trois phases, pour chacun des indicateurs. Dans la première phase, une expérimentation a été basée sur l'utilisation de moyens de mesures très précis en regard des précisions attendues sur les indicateurs : un GPS-RTK<sup>1</sup> embarqué dans un véhicule associé à une cartographie d'une précision centimétrique. Cette expérimentation a permis à la fois de calculer les indicateurs de la conduite de référence en conditions réelles, et de développer une vérité terrain pour la deuxième phase. Ainsi, sur cette base nous avons pu

---

<sup>1</sup> GPS : Global Positioning System ; RTK : Real Time Kinematic

évaluer les indicateurs obtenus à partir de capteurs plus réalistes, tels que les caméras, les odomètres, etc. Dans la dernière phase, nous avons fait une analyse critique des résultats.

### *Développement de la vérité terrain*

Sur la base d'un capteur de grande précision (un GPS – RTK de précision centimétrique) et d'une cartographie de même niveau de précision recensant les marquages centraux, droites et gauches, nous avons, dans un premier temps, assuré la disponibilité de la mesure fournie par le capteur, puis, développé les différents indicateurs recensés par les sujets 1 et 2.

#### **Disponibilité de la mesure centimétrique du capteur GPS**

Pour assurer la disponibilité du mode centimétrique, un recueil de données a été effectué sur une durée de une semaine. Les mesures ont été effectuées entre 9h et 19h. Cette large plage de mesure permet d'observer diverses constellations satellitaires. La Figure 12 montre l'accumulation des résultats de plus de 200 tours de piste. Au plus le trait est fin, au plus le positionnement centimétrique est disponible. Dans la partie basse de la piste, l'obtention de la précision maximale est faible : pour la partie ouest, elle est obtenue dans moins de 30% des trajets, contre 50% dans la partie est. Sur le reste de la piste, la précision centimétrique est obtenue dans plus de 90% des cas, notamment pour le virage nord ouest, avec une obtention de la précision maximale dans plus de 95% des passages.

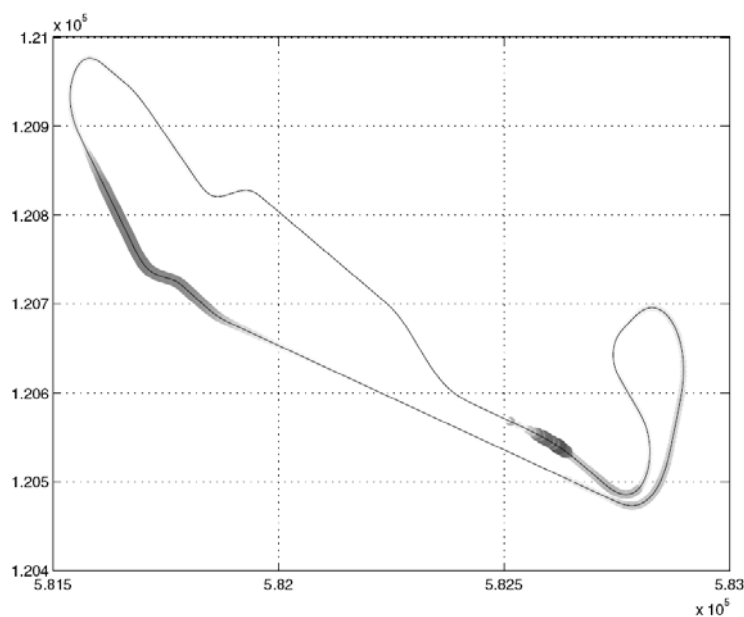


Figure 12 : Piste de Satory et erreur de positionnement

#### **Développement de l'indicateur TLC sur la base des capteurs précis**

Le TLC est, par définition, le temps restant au véhicule, continuant sa trajectoire, pour franchir un des bords de la voie. Cette définition ne permet pas de fournir une unique formule pour calculer le TLC. Plusieurs approximations peuvent être faites concernant :

1. la trajectoire du véhicule : on peut considérer une trajectoire en ligne droite (LD) ou prendre en compte l'angle au volant donné par le conducteur ( $C_e$ )
2. le bord de voie : il peut lui aussi être considéré comme une ligne droite (LD) ou alors comme un cercle en prenant la courbure de la route (RR)

Les différentes approximations sont résumées sur la Figure 13. Ces approximations peuvent amener, dans une même situation, à des TLC très différents, dans la valeur, ainsi qu'au niveau du côté de sortie de voie

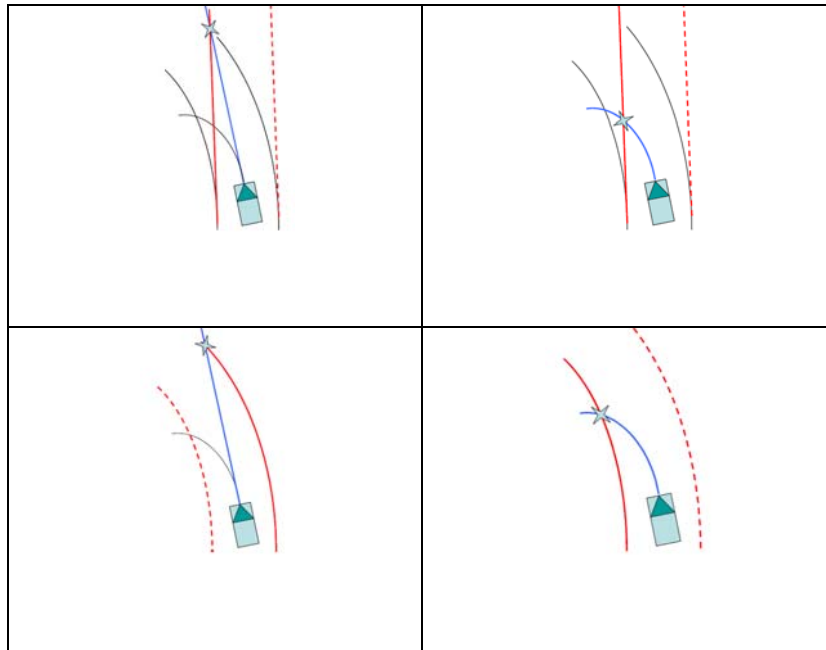


Figure 13: Représentation des différentes hypothèses de calcul du TLC

Ces quatre versions du TLC ont ensuite été évaluées sur des situations de conduite normale, comme le montre la

Figure 14. Sur la figure gauche, les TLC sont évalués sur une ligne droite, sur celle de gauche en situation de sortie de voie. Les différentes méthodes de calculs donnent des résultats équivalents pour des valeurs faibles du TLC. Par contre, pour des valeurs élevées, la prise en compte de la forme de la route limite fortement le bruit sur la mesure.

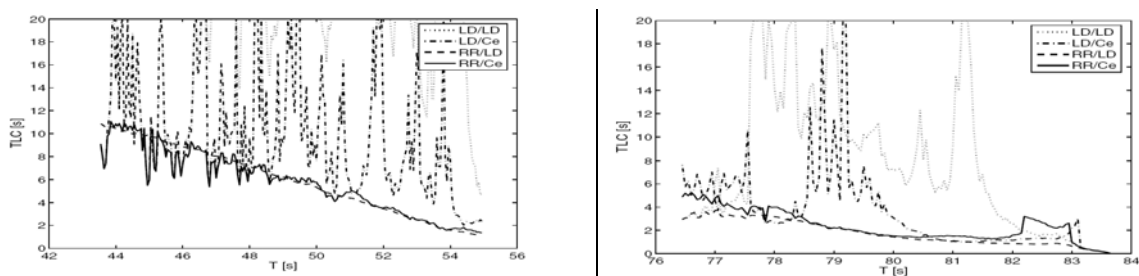


Figure 14 : Evaluation des TLC sur une ligne droite et dans une situation de sortie de voie

### Développement de l'indicateur point de corde sur la base des capteurs précis

La définition du point de corde est plus précise que celle du TLC et permet d'obtenir directement un unique indicateur. Néanmoins, l'évaluation fondée sur les capteurs précis peut

être problématique : en effet, en connaissant l'intégralité de la route à venir, il faut trouver le « bon » point de corde dans une succession de virage. La

Figure 15 développe la méthode employée pour le calcul de la position du point de corde sur la base du GPS RTK et de la cartographie centimétrique. Dans un premier temps, pour chaque point du marquage, l'algorithme évalue l'angle relatif avec le véhicule. Ensuite, on calcule la dérivée de ces données, le passage par zéro nous donne la position du point de corde. Finalement, comme le montre la figure de droite, la recherche est volontairement limitée à une certaine distance pour assurer une compatibilité avec la vision.

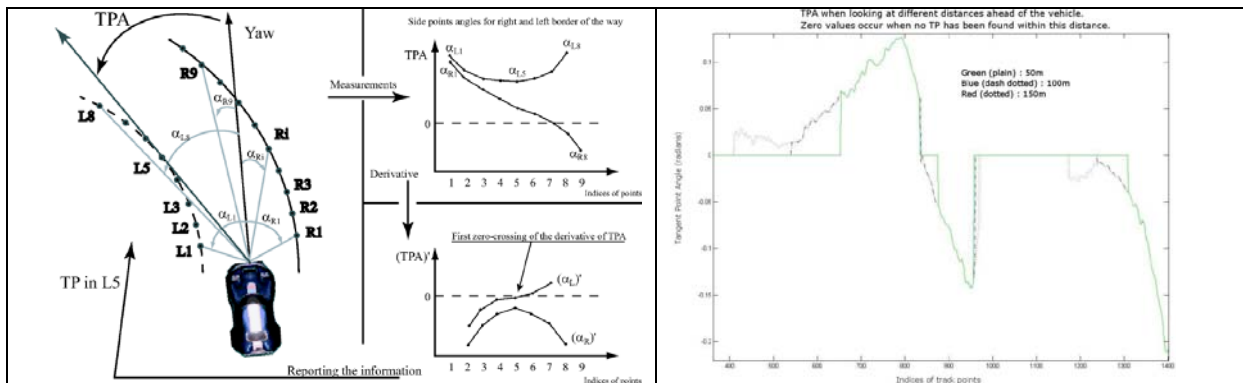


Figure 15 : Evaluation de la position du point de corde sur la base du GPS RTK

Compte tenu de la discrétisation des positions des marquages dans la carte centimétrique, une attention particulière est portée sur la dérivation de l'angle.

### Développement et évaluation des indicateurs fondés sur la vision

Les indicateurs développés sur le système précédent (couple GPS RTK et carte centimétrique) ont l'avantage d'une grande précision. Néanmoins, le coût du système est prohibitif pour l'implantation sur des véhicules de série. Ainsi les indicateurs ont été évalués sur la base d'une perception par un système de vision. Pour cela, les deux indicateurs ont besoin de la connaissance de la position relative des marquages. Ils sont ensuite calculés en utilisant les méthodes décrites précédemment.

#### Détection du marquage

La détection du marquage est effectuée par le système développé au LIVIC qui consiste en deux modules de détection bas niveau (travaillant directement sur l'image pour la détection du marquage) donnant les positions des marquages dans l'image et un algorithme de haut niveau, utilisant les données précédentes pour renseigner un modèle de route. Ce modèle positionne les marquages de la voie relativement au véhicule. L'algorithme complet est décrit dans la Figure 16.

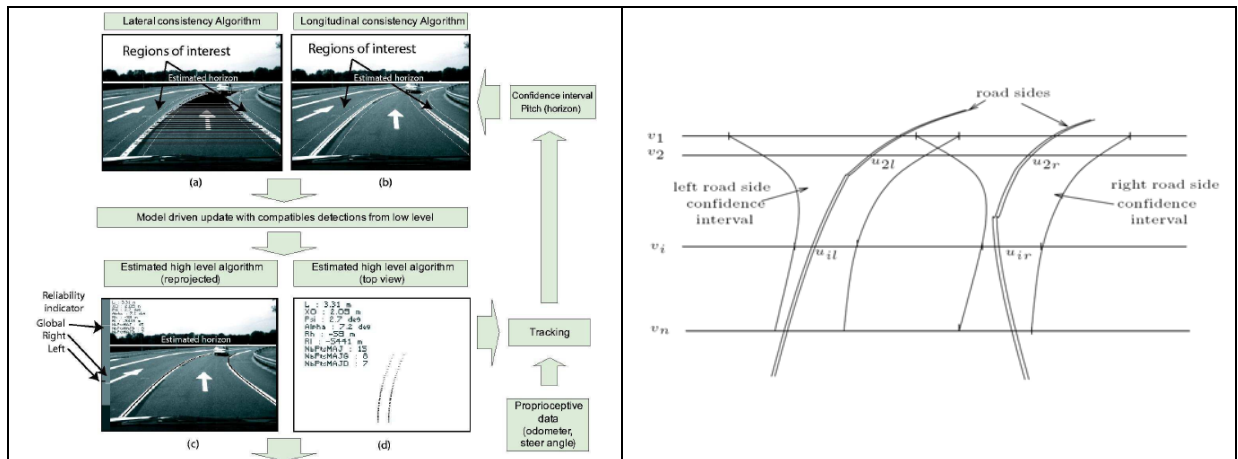


Figure 16 : Détection du marquage

### Evaluation de l'indicateur du TLC fondé sur la vision

L'évaluation du TLC a été menée sur la base de neuf enregistrements sur piste des paramètres issus de la vision et des capteurs précis. Lors de ces essais, plusieurs situations ont été expérimentées, allant de la conduite normale, à de la conduite en slalom, ainsi qu'un essai véhicule arrêté. La

Figure 17 montre un extrait de ces expérimentations, avec l'évaluation du TLC avec l'hypothèse d'une route réelle et d'une trajectoire circulaire. L'évaluation, fondée sur la vision est bonne pour des valeurs faibles du TLC. En effet, pour des TLC importants, il faut que la route soit perçue à une longue distance, au delà de la portée des capteurs utilisés.

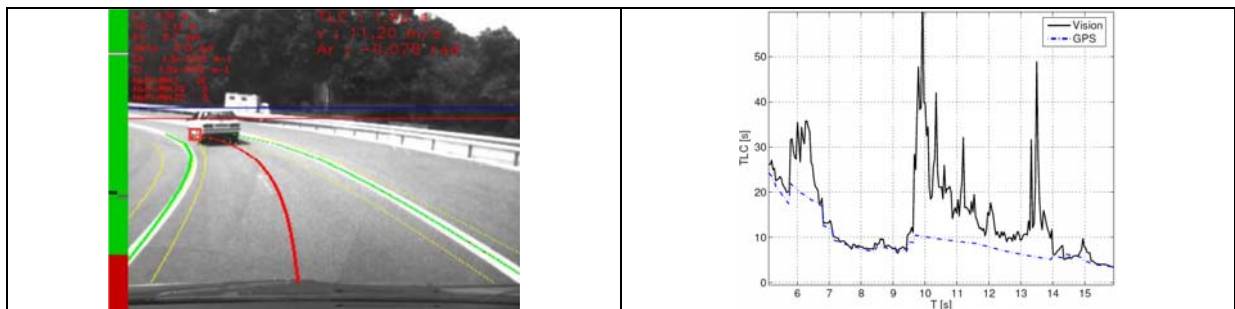


Figure 17 : Evaluation du TLC, prise en compte du braquage

La

Figure 18 montre les intervalles de confiance en fonction d'une erreur admissible. Dans les deux cas, l'évaluation des TLC faibles est relativement bonne, elle reste néanmoins impossible en deçà d'une certaine valeur, du fait de la configuration de la caméra sur le véhicule. Pour des valeurs de l'ordre de 3 secondes, seul le TLC évalué en prenant en compte la courbure de la trajectoire donne des résultats satisfaisants.

Dans tous les cas, il est intéressant de noter que la relation d'ordre entre les valeurs du TLC calculé en ligne droite ou en prenant en compte le braquage, est conservée.

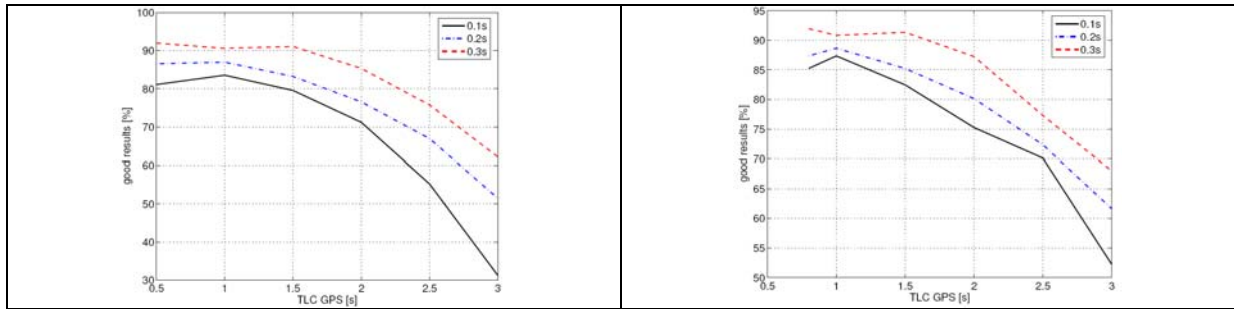


Figure 18 : Pourcentage de bonnes évaluations du TLC en fonction d'une erreur admissible, pour une trajectoire en ligne droite du véhicule (gauche) et une trajectoire circulaire (droite)

### Evaluation de l'indicateur du point de corde fondé sur la vision

Une première évaluation de l'indicateur de point de corde a utilisé directement les données issues de l'algorithme de haut niveau de détection de la route. Ce dernier n'a pas donné de résultats satisfaisants sur certains objets routiers, notamment pour des entrées en virage avec une pente. Aussi trois autres méthodes d'évaluation ont été développées :

1. En repartant de la détection bas niveau, projeté dans le monde route, et en utilisant le même algorithme que pour le GPS RTK
2. En utilisant directement la position des marquages dans l'image, cette définition est la plus proche de celle utilisée dans le simulateur
3. En cherchant certains « pattern » dans l'évolution dans la position des marquages.

La Figure 19 montre les résultats des quatre méthodes précitées (dans l'ordre, modèle de la route, point en 3D, position dans l'image et pattern)

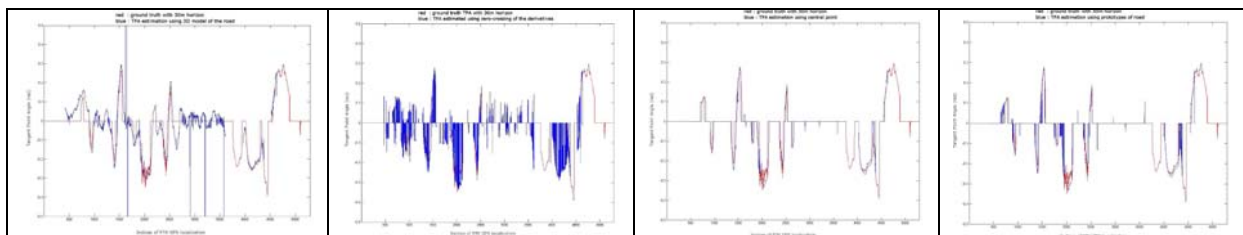


Figure 19 : Evaluation des différentes méthodes de calcul de la position du point de corde

Les deux dernières méthodes donnent les meilleurs résultats, avec près de 90% de bons résultats en admettant une erreur de 3°, de sont aussi les deux seules méthodes qui ont plus de 50% de bons résultats en supposant une erreur proche de 1°.

## Synthèse des résultats

L'utilisation de la vision pour détecter les indicateurs développés par les sujet 1 et 2 offre un bon compromis entre précision et coût. C'est, de plus, le seul capteur permettant de localiser le véhicule relativement à la route. Que ce soit pour le TLC et le point de corde, la précision possible sur ces indicateurs est bonne si l'information est à rechercher entre 10m et 35m : on peut raisonnablement espérer que cette distance maximale augmentera en utilisant des capteurs stéréos. Un indicateur est particulièrement robuste : il s'agit de la comparaison entre les TLC évalués pour des trajectoire en ligne droite et en prenant en compte le braquage. En effet, la relation d'ordre nous indique si le conducteur a pris en compte l'infrastructure à venir.

# Projet 4 : Elaboration de la fonction de risque et validation du référentiel commun

---

## Responsables :

Sébastien Glaser (LIVIC) & Jean Michel Hoc (IRCCyN)

## Chercheurs impliqués :

Yunchao Tang (IRCCyN)  
Romain Gallen (LIVIC)  
Saïd Mammar (LIVIC)  
Chouki Sentouh (LIVIC)  
Benoit Lusetti (LIVIC)

## Annexes en rapport :

- Annexe 9 - Projet 4.1 : Elaboration de la fonction de risque (Sébastien Glaser)
- Annexe 10 - Projet 4.2 : Validation du référentiel commun (Y. Tang, J.-M. Hoc, J.-F. Petiot)
- Annexe 11 - Projet 4.2 : Appendices (Y. Tang)

## Contexte et objectifs

Les travaux réalisés dans les projets 1 à 3 visent à développer et à valider divers indicateurs de la conduite. Ces indicateurs représentent une partie du risque lié à la conduite par rapport à une tâche particulière comme le positionnement latéral. D'autres indicateurs sont considérés par ailleurs (écart latéral au centre de gravité, vitesse, accélération latérale, adhérence mobilisable, etc.). L'objectif de ce sujet est de définir un descripteur du risque lié à la conduite. Ce descripteur doit fournir, du point de vue machine, un niveau de risque en adéquation avec le ressenti conducteur. L'objectif est de pouvoir anticiper les risques de sorties de voie, tout en limitant les intrusions excessives des systèmes d'assistances dans la conduite. Ainsi, le travail était composé de deux parties. La première visa à synthétiser le descripteur à partir de différents indicateurs de la conduite, y compris ceux définis par les projets 1 à 3. La seconde valida ce descripteur par rapport aux stratégies, essentiellement implicites, de gestion du risque par le conducteur.

## Travaux réalisés

L'objectif du sous-projet 4 « fonction de risque et référentiel commun » était d'établir et d'évaluer une fonction de risque commune entre le conducteur et une assistance pour la correction de la trajectoire en virage. Pour la conception de l'assistance de conduite, il s'agissait de trouver des seuils de déclenchement sur une telle fonction. Mais, avant de définir une fonction, il convenait de trouver les paramètres les mieux à même d'expliquer (au sens de la corrélation) le comportement de correction de la trajectoire par le conducteur. Ce comportement, en effet, est en grande partie lié au risque ressenti.

## Descripteur de la conduite

Cette première partie vise à fournir une synthèse des différents indicateurs de la conduite disponibles. Cette synthèse a pour objectif d'aboutir à un descripteur du risque, pouvant être fonction de différents indicateurs, en adéquation, d'une part, avec les processus de contrôle de la trajectoire mis en place par le conducteur (projets 1 et 2) et, d'autre part, avec les limitations techniques des moyens de mesure envisagés (projet 3).

Dans un premier temps, la temporalité et l'utilisation des différents indicateurs a été déterminée (Figure 20). En effet, les différents indicateurs ne régissent pas la conduite dans toutes les phases. Ainsi, nous avons discerné trois éléments routiers fondamentaux : la ligne droite, la clothoïde<sup>2</sup> et la portion circulaire du virage. Sur chacun de ces éléments les sollicitations dynamiques supposées du véhicule sont très différentes :

- En ligne droite, la sollicitation est principalement longitudinale et doit permettre de réguler la vitesse pour aborder les éléments routiers suivants.
- Dans la portion circulaire du virage, à l'inverse la sollicitation est principalement latérale. Le conducteur régule peu sa vitesse, mais il doit assurer une tâche de contrôle pour maintenir son véhicule dans la voie. Cette action génère principalement une accélération latérale
- Sur la clothoïde, les sollicitations sont couplées. En effet, le conducteur finit de réguler sa vitesse et entame la tâche de contrôle latérale.

De plus les descripteurs du risque ne sont pas utilisables dans toutes les situations, hormis pour la tâche du contrôle de positionnement latérale, l'accélération latérale n'a pas de sens en ligne droite par exemple. Pour le point de corde, il faut pouvoir percevoir le virage (clothoïde et portion circulaire). Pour le TLC, il peut atteindre de très grandes valeurs en ligne droite, ce qui n'apporte pas d'informations. Lorsqu'en ligne droite, il atteint des valeurs faibles, certains TLC ont le même comportement que le positionnement latéral.

Ligne droite						clothoïde				Virage				
Positionnement latéral														
Vitesse excessive														
						Point de corde								
										TLC				
											Accélération latérale			

Figure 20 : Temporalité des indicateurs

En prenant en compte les développements du sujet 3, une amélioration est apportée à la prise en compte du TLC en utilisant la relation d'ordre entre le TLC calculé pour une trajectoire en ligne droite (noté TLD) et celui calculé en prenant en compte l'angle de braquage (noté TCI) (Figure ). En effet, lorsque le TLD est faible, cela signifie le véhicule encourt en certain risque. Or, si le TCI est supérieur au TLD, le conducteur a pris en compte ce danger et a initié une manœuvre de correction. A l'inverse, un TCI plus faible qu'un TLD montre une mauvaise interprétation de la part du conducteur de la difficulté à venir. Cette comparaison permet à la fois d'obtenir un seuil pour l'alerte ou la correction, mais surtout elle limite les sur alertes : lorsque le véhicule est dans une situation à risque, et que le conducteur a initié une correction.

<sup>2</sup> La clothoïde est une spirale permettant de faire une transition continue en terme d'accélération latérale entre la ligne droite et la portion circulaire du virage. La courbure évolue continûment en fonction l'abscisse curviligne.

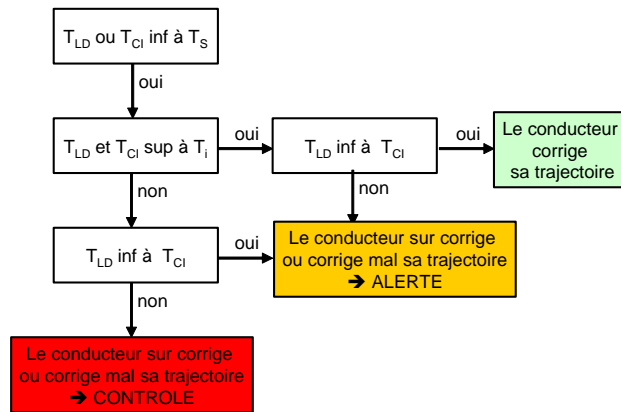


Figure 21 : Comparaison des TLCs

Dans un second temps, les différents indicateurs ont été utilisés pour définir un descripteur du risque. Au delà d'une simple fonction, quatre modules d'alerte ont été définis :

- Le premier module compare la vitesse du conducteur avec un profil, fonction de la géométrie à venir et du style de conduite<sup>3</sup>.
- Le second module traite de la dynamique latérale et de la différence entre le comportement observé du véhicule et le comportement supposé.
- Le troisième module traite le positionnement latéral dans la voie, et agit en permanence.
- Le quatrième module analyse le temps à sortie de voie et génère les alertes adéquates.

Ces quatre modules nous permettent de traiter une grande partie des situations de conduite vis-à-vis des problèmes de sortie de voie.

### Validation du référentiel commun et d'un descripteur du risque

L'expérience, visant la validation des descripteurs et du référentiel commun, a été réalisée sur un virage à gauche assez long (130 m) et de faible rayon de courbure (50 m) d'une piste d'essai, sans trafic, avec un véhicule instrumenté et 5 conducteurs expérimentés. Les conducteurs devaient passer le même virage plusieurs fois, d'abord avec une vitesse estimée confortable par le conducteur, puis avec des vitesses croissantes (par pas de 5 Km/h) imposées à l'entrée de virage (4 ou 5 jusqu'au refus du conducteur). Ces différents passages nous permettent de construire un référentiel lié au conducteur pour juger du passage d'une conduite confortable à une conduite à risque. Pour des raisons de sécurité, la conduite se faisait sur la voie de gauche. On a enregistré un certain nombre de paramètres dont on connaît déjà l'implication dans l'évaluation des trajectoires par les conducteurs, par exemple : le TLC, l'écart latéral, l'angle du point de corde (par rapport au droit devant), l'accélération latérale, la vitesse, etc. Le contrôle latéral correspond à l'évolution de l'angle de braquage, le contrôle longitudinal à celle de l'accélération longitudinale. Ces paramètres sont ceux issus de la première partie du sujet 4.

<sup>3</sup> Le module est décrit dans S. Glaser, V. Aguiléra, "Vehicle-Infrastructure-Driver Speed Profile: Towards the next generation of curve warning systems" ITS World Congress, Madrid, Spain 2003 et la fonction de risque associée dans V. Aguiléra, S. Glaser and A. Von Arnim, "An Advanced Driver Speed Assistance in Curves: risk function, cooperation modes, system architecture and experimental validation." IEEE Conference on Intelligent vehicle, Las Vegas, 2005

Une analyse en composantes principales (ACP) a été d'abord appliquée pour regrouper les variables et enlever les redondances. Il est ressorti 4 principaux facteurs, chacun plus particulièrement défini par une variable perceptible par le conducteur : Facteur 1 : Angle du point de corde ; 2 : Évolution de l'angle ; 3 : Écart latéral ; 4 : Angle de cap.

Le risque en virage correspond à la probabilité de sortie de la voie et à ses conséquences. La probabilité de sortie de voie est plutôt liée aux TLCs. Nous avons aussi fait une analyse de risque selon les TLCs : TLC rectiligne, TLC avec la courbure de route ajoutée et TLC avec le braquage ajouté. Cette analyse a montré que le conducteur freine fortement quand le TLC rectiligne (vers la droite dans ce virage à gauche) passe en dessous de 0.8 sec. à l'entrée et que ce TLC atteint une valeur minimum de 0.3 sec. ( $\pm 0.1$  sec. selon les conducteurs) à l'intérieur du virage. Bien que les TLCs puissent permettre d'évaluer les risques instantanés, ils ne permettent pas de discriminer les facteurs de l'ACP ; ils sont un peu corrélés avec tous les facteurs.

Après ces analyses, nous avons utilisé la méthode de régression linéaire instantanée pas à pas afin de trouver les paramètres les plus pertinents pour régresser ou expliquer les comportements (longitudinaux et latéraux) des conducteurs. En termes de contrôle latéral, les variables les plus pertinentes pour expliquer l'évolution du braquage sont l'évolution de l'angle du point de corde, l'écart latéral et le cap. En termes de contrôle longitudinal, c'est l'évolution de l'accélération latérale qui explique le mieux le freinage.

Ensuite, nous avons observé des comportements différents à l'entrée, au milieu et à la sortie du virage. Nous avons coupé le virage en trois tronçons et produit des modèles de régression séparément selon les tronçons. Le risque, tel que nous l'avons évalué à partir des TLCs, se trouve le plus élevé à l'entrée du virage. L'accélération latérale est la plus importante au milieu du virage. Elle est d'environ 0.7~0.8 g ( $\pm 0.1$  g selon les conducteurs) pour le passage à la vitesse la plus élevée.

Nous avons également construit les meilleurs modèles de régression avec des décalages temporels. Les décalages optimaux restent très faibles (de 40 à 80 msec.). Les meilleurs modèles rendent compte de 45% de la variance pour le contrôle latéral et environ 30% pour le contrôle longitudinal. La capacité d'explication du modèle dépend du choix des variables, du tronçon étudié et du décalage temporel. De plus, un modèle d'auto-régression permet de bien prédire l'état du véhicule sur la base des états passés.

Enfin, pour chaque conducteur, à partir de son modèle de régression temporellement décalé, du modèle d'auto-régression, des seuils de TLC et de l'accélération latérale, nous avons proposé un modèle d'intervention de l'assistance à la conduite. Le principe de la méthode est d'abord d'utiliser la régression linéaire multi-variables pas à pas pour choisir les paramètres pertinents. Du fait de la temporalité des données, le modèle AR (auto-régression) et ARX (auto-régression avec des entrées extérieures) ont été appliqués. L'objectif était de bien « identifier » le modèle de conducteur avec ces modèles (AR ou ARX) enfin de simuler le comportement de conducteur.

Deux résultats apparaissent marquants par rapport à la littérature sur le comportement du conducteur. En premier lieu, les TLCs ne paraissent pas être de bons candidats pour expliquer les corrections du conducteur. En second lieu, l'angle du point de corde paraît jouer un rôle prépondérant pour le contrôle latéral, mais il est loin d'être le seul déterminant.

## Synthèse et perspectives

Le principal problème rencontré quant à l'élaboration et à la validation d'un descripteur du risque vis-à-vis des sorties de voies concerne à la fois la diversité des situations de conduites que l'on peut rencontrer et la multiplicité des référentiels entre conducteurs. Ainsi il est difficile de définir un descripteur unique de la conduite, et il est tout aussi compliqué de l'évaluer. Néanmoins, certaines pistes investiguées en fin de projet semblent prometteuses. Aussi, suite à ce travail, quelques perspectives sont proposées :

- Sur la définition du descripteur :
  - o La notion de point de corde va être étendue pour couvrir à la fois les lignes droites et les virages.
  - o Une autre méthode de fusion de données doit être testée, elle consiste en des modules de logiques floues fusionnant les différentes informations.
- Sur la méthode d'évaluation :
  - o Le modèle utilisé reste sur paramétré, en intégrant les erreurs. Une méthode de régression partielle des moindres carrés pourrait éviter de modéliser l'erreur.
  - o Les limites du modèle linéaire pourraient être dépassées en rendant mieux compte des phénomènes de seuil grâce à des architectures de type réseau de neurones.
  - o Enfin, pour mieux traiter ce genre de données qui ont une structure de série temporelle, d'autres modèles de régression pourraient être appliqués : le modèle linéaire généralisé et le modèle additif généralisé.
  - o Le test en lui-même doit être étendu à un plus grand nombre de sujets

# Projet 5 : Coopération homme-machine appliquée au contrôle latéral du véhicule : contrôle mutuel et délégation de fonction

---

## Responsables :

Franck Mars & Jean Michel Hoc (IRCCyN)

## Chercheurs impliqués :

Jordan Navarro (IRCCyN)  
Jean-François Forzy (Renault)  
Myriam El-Jaafari (Renault)

## Annexes en rapport :

- Annexe 12 - Projet 5 - Expérience 1 (J. Navarro, F. Mars, J.-M. Hoc)
- Annexe 13 - Projet 5 - Expérience 2.1 (J. Navarro, F. Mars, J.-M. Hoc)
- Annexe 14 - Projet 5 - Expérience 2.2 (M. El-Jaafari, J.-F. Forzy)
- Annexe 15 - Projet 5 - Expérience 3 (J. Navarro, J.-M. Hoc, F. Mars)

## Contexte et objectifs

Les projets 1 à 4 de Prevensor ont essentiellement visé à évaluer la pertinence de certains indicateurs de la conduite pour anticiper les risques de sortie de voie, d'une part, et à élaborer une fonction de risque incluant ces indicateurs, d'autre part. La finalité de cette fonction de risque est de déterminer les conditions de déclenchement d'assistances à la conduite et leur temporalité. Il s'agit pour l'automate d'intervenir dans la tâche de conduite avant que le conducteur ne place son véhicule dans une situation critique. Il se pose alors la question des modalités d'intervention de l'assistance, de sorte que la coopération entre les deux agents s'effectue le plus efficacement possible.

Hoc et Blosseville (2003) ont proposé une classification des situations selon le statut coopératif de la machine et son degré d'intervention dans le contrôle du véhicule :

- Le *mode perceptif* a pour fonction d'enrichir les informations sensorielles et de fournir des mesures inaccessible directement au conducteur. L'enrichissement de la scène visuelle tel qu'il est envisagé dans le projet 1 relève de ce type d'assistance.

- Le *contrôle mutuel* implique une intervention de l'assistance lorsque le conducteur dépasse un seuil prédéfini en termes de risque (de sortie de voie, par exemple). L'intervention peut consister en une simple critique du comportement du conducteur (alerte), une suggestion d'action ou en une action sur le contrôle du véhicule.

- La *délégation de fonction* consiste à confier à l'automate une part de l'activité de conduite, tout en laissant le reste sous le contrôle manuel du conducteur.

- Le *mode automatique* confie l'ensemble de la tâche de conduite à l'automate, le rôle du conducteur se résumant alors à celui de superviseur.

Le projet 5 s'est penché plus précisément sur l'évaluation du contrôle mutuel et de la délégation de fonction, tous deux appliqués au contrôle latéral. Le cadre théorique pertinent est double. Il relève d'abord de la compréhension des coordinations sensori-motrices qui permettent de gérer la trajectoire du véhicule. Il s'inscrit ensuite dans l'analyse des mécanismes de CHM, vue comme une gestion d'interférences entre agents.

En ce qui concerne le contrôle mutuel, les types d'intervention de la machine peuvent être spécifiés en fonction du module de traitement concerné : on va chercher à améliorer le diagnostic de la situation et/ou la mise en œuvre de correction nécessaire. Plus l'action du dispositif va s'insérer efficacement dans les boucles sensorimotrices du conducteur (intervention à un niveau subsymbolique), plus la mise en œuvre de la réponse a des chances d'être rapide et efficace. Mais il ne faut pas exclure des interférences négatives. Tout d'abord, il peut y avoir désaccord entre les diagnostics des deux agents (défaut de référentiel commun). Ensuite, même si les diagnostics sont similaires, la façon dont l'action est suggérée peut gêner la mise en œuvre de l'action ou provoquer une sur-correction, alors même que l'on cherche à faciliter la réponse.

En ce qui concerne la délégation de fonction, il s'agit surtout d'apporter des preuves expérimentales de l'existence de difficultés de reprise en main du véhicule quand la situation dérive hors des limites de validité de l'automate. Ces difficultés seraient la conséquence d'un phénomène de contentement et pourraient prendre leur source dans une négligence des informations utiles à la réalisation de la fonction déléguée.

## **Travaux réalisés**

### *Expérience 1 - Contrôle mutuel : amorçage moteur et avertissement comme aides à la correction de trajectoire*

Les assistances au contrôle latéral les plus couramment étudiées à l'heure actuelle peuvent se résumer à deux grandes classes de dispositifs : les alertes aux sorties de voie (LDWS : Lane Departure Warning Systems), qui avertissent le conducteur sans intervenir sur la direction du véhicule, et les aides au maintien latéral (LKAS : Lane Keeping Assistance Systems), qui agissent sur la colonne de direction pour assister le conducteur. Ces deux types de dispositif interviennent à des niveaux de contrôle différents. Alors que les alertes sont supposées améliorer le diagnostic de la situation en informant le conducteur de l'état de son véhicule dans le monde ou de la nécessité d'effectuer une action correctrice, les LKAS agissent directement au niveau de l'exécution de l'action. L'expérience 1 s'est intéressée à un dispositif à la charnière entre ces deux catégories d'assistances, dans la mesure où il s'adresse au niveau de l'action, mais sans directement agir sur la direction. L'assistance prend la forme d'une vibration asymétrique du volant lors d'un écart au centre de la voie trop important. Le caractère asymétrique de la stimulation haptique sur l'organe de commande renseigne le conducteur sur la direction de la correction à apporter, sans nécessité de passer par un contrôle symbolique.

Cinq modalités d'assistance ont été testées sur simulateur de conduite (simulateur MSIS, projet 7) :

- Un avertissement sonore latéralisé (AS) imitant le passage du véhicule sur une bande rugueuse.
- Un avertissement vibratoire (AV) consistant en une simple vibration du volant.
- Un amorçage moteur (AM) prenant la forme d'une vibration asymétrique sur le volant. L'asymétrie du signal indique le sens de la correction à réaliser, tout en ayant un effet négligeable sur la trajectoire.
- La combinaison des modes AS et AV (ASV).
- La combinaison des modes AS et AM (ASAM).

Des occlusions visuelles ont été introduites en conduite afin de générer des sorties de voie en virages comme en lignes droites. Le comportement des conducteurs ont été étudiés au travers de différentes variables, dont les durées de sortie de voie qui témoignent du temps que les conducteurs ont passé dans une position sur la voie jugée dangereuse, les temps de réponse qui quantifie la réactivité du conducteur, et les pics d'accélération au volant qui reflètent la vivacité de la réponse.

Comparativement à la condition contrôle, les résultats montrent une réduction équivalente des temps de réponse sur le volant avec l'ensemble des assistances testées. Toutes les assistances réduisent également les durées de sortie de voie, mais des différences entre les modalités d'assistances apparaissent (Fig. 22). Les modalités AS, AV et ASV engendrent des réductions de durées de sortie de voie similaires et inférieures à celles des modalités AM et ASAM. Des résultats très similaires sont obtenus pour les pics d'accélération au volant.

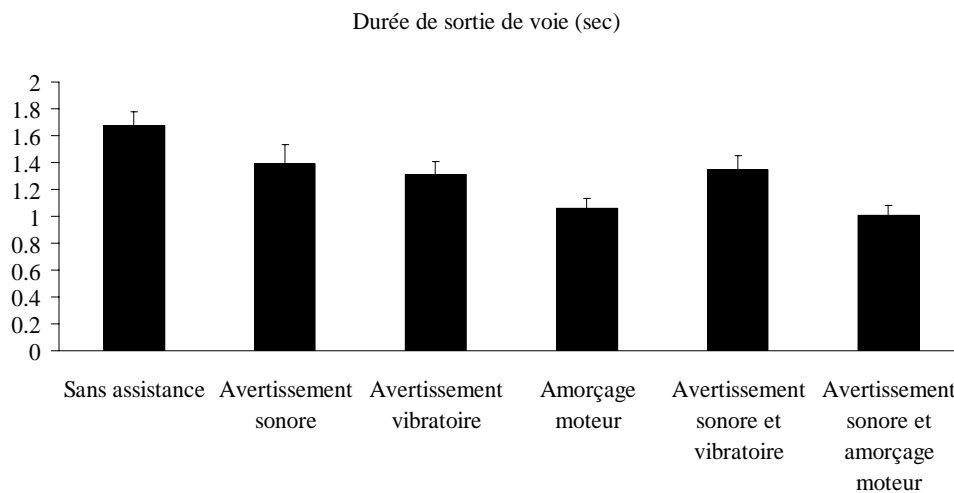


Figure 22 : Durées de sortie de voie sans assistance et avec les différentes modalités d'assistances étudiées.

Les modes amorçage moteur (AM et ASAM) sont donc les modalités qui améliorent le plus les manœuvres de correction de trajectoire. Ces résultats vérifient l'hypothèse qu'une assistance directionnelle agissant au niveau moteur est plus efficace qu'une assistance alertant les conducteurs et nécessitant des traitements cognitifs de plus haut niveau. Par ailleurs, un avertissement informant les conducteurs sur le côté de sortie de voie n'est pas plus profitable qu'un avertissement n'indiquant pas le côté de sortie de voie (pas de différences entre les modes AS et AV). Aucune assistance visant à faire conduire au centre de la voie n'a gêné le

contournement d'obstacles. Ceci montre qu'un diagnostic de haut niveau peut inhiber l'effet de l'assistance lorsque c'est adapté.

## *Expérience 2 - Contrôle mutuel : performance et acceptabilité comparées de plusieurs modalités d'amorçage moteur et d'avertissement*

Dans l'objectif d'affiner la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'effet de l'amorçage moteur, l'expérimentation 2 dissocie les différents éléments qui caractérisent ce type d'assistance et cherche à déterminer l'importance relative de chacun. L'amorçage moteur est-il plus efficace parce que :

- il agit directement au niveau moteur sans nécessiter l'intervention du diagnostic de la situation ?
- il agit au niveau de l'effecteur (en l'occurrence, sur le volant) ?
- il fournit une indication sur la direction de la correction de trajectoire à apporter ?
- il mobilise la modalité haptique ?

L'acceptabilité des différentes modalités d'assistance a été évaluée à l'aide d'un classement par rang de préférence, ainsi qu'au travers de l'analyse de verbalisations post-expérimentales. L'hypothèse d'une faible acceptabilité de l'AM (en raison de sa plus grande intrusivité perçue dans l'activité de conduite) et celle d'une forte acceptabilité de la modalité AS (caractère familier des bandes rugueuses) nous a conduits à évaluer un mode combiné de ces deux assistances : l'AM pourrait rendre l'assistance efficace et l'AS acceptable.

Les modes suivants d'assistance ont été évalués sur le simulateur CARDS 2 (Renault) :

- Amorçage moteur (AM), similaire à l'expérience 1.
- Avertissement latéralisé au volant (AVL): stimulation haptique non-incitative, au niveau de l'effecteur. Seule la moitié du volant du côté de la sortie de voie vibrait.
- Avertissement latéralisé sur le siège (ASL): stimulation haptique non-incitative, déportée de l'effecteur. La partie du siège située du côté de la sortie de voie vibrait.
- Avertissement sonore latéralisé (AS): stimulation sonore non-incitative, déportée de l'effecteur, identique à l'expérience 1.
- La combinaison des modes AM et AS (ASAM).

Des sorties de voie ont été provoquées grâce à une tâche de lecture sur un écran situé à l'intérieur du véhicule, associée à une déviation de trajectoire du côté de la sortie de voie désirée.

Les résultats confirment la meilleure efficacité des modes AM et ASAM comparativement aux autres assistances, qui ne se distinguent pas entre elles. Le fait d'indiquer la direction de la correction à apporter par le biais de la modalité haptique, même lorsque cette indication se fait directement sur le volant (organe de contrôle de la trajectoire du véhicule), n'explique pas le bénéfice observé avec l'AM. En conséquence, le bénéfice de l'amorçage moteur réside sur son effet direct au niveau moteur. De façon dissociée, l'analyse des données subjectives (cf. Fig. 23 pour le classement par rangs) révèle que le mode AS est l'assistance préférée des conducteurs, tandis que l'AM est l'assistance la moins appréciée. Les autres assistances occupent une position intermédiaire. La combinaison AM et AS semble donc être un bon compromis entre performance et acceptabilité.

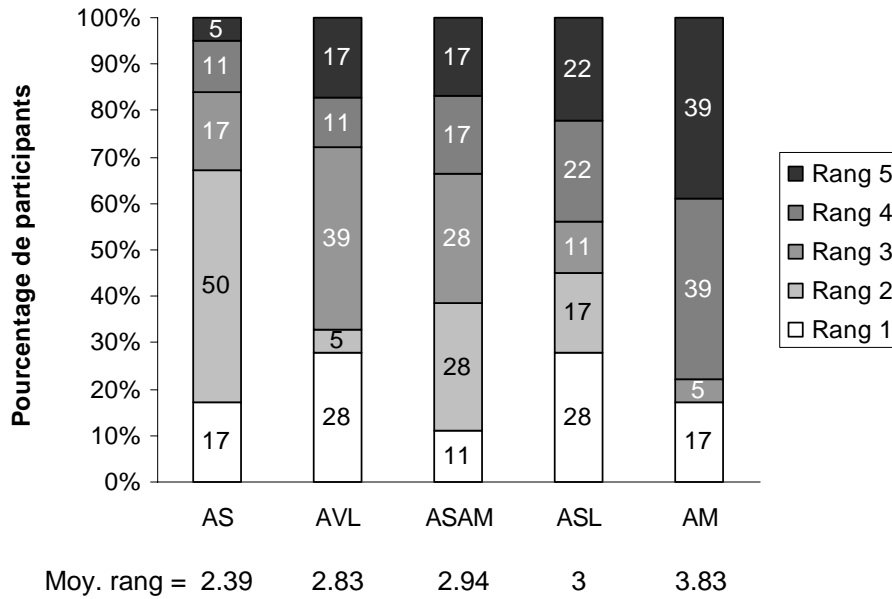


Figure 23 : Classement des modalités d'assistance par rang : de la modalité ayant été la mieux classée à la modalité ayant été la moins bien classée.

### Expérience 3 - La délégation du contrôle latéral : cas de la reprise en main en situation d'invalidité

L'expérience 3 porte sur les adaptations comportementales à un automate prenant en charge de façon autonome le maintien du véhicule dans la voie de circulation. La tâche de contrôle latéral du véhicule habituellement allouée aux conducteurs est déléguée au dispositif. Le rôle du conducteur consiste alors à réguler sa vitesse (contrôle longitudinal du véhicule) et à superviser le bon fonctionnement de l'assistance. Lors d'une expérimentation sur piste, Hoc et al. (2006) ont utilisé un évitement d'obstacle (situation se trouvant être hors du domaine de validité de l'assistance) pour étudier la reprise en main de la gestion du contrôle latéral du véhicule. Des indices de difficultés de reprise en main avaient été observés, en particulier un contournement plus tardif et plus brutal de l'obstacle. L'objectif principal de cette étude est de confirmer les difficultés de reprise en main associées à ce type de délégation de fonction et, le cas échéant, de déterminer si une modification des stratégies visuelles peut être à l'origine de ces difficultés.

Cette étude a été menée sur le simulateur SIM<sup>2</sup> (projet 7) en utilisant une modélisation graphique de la piste d'essai de Satory (Versailles). Les participants étaient informés du principe de fonctionnement de l'assistance au contrôle latéral. Les consignes étaient de garder les mains sur le volant, de respecter les limitations de vitesse et d'éviter les obstacles situés sur la voie au cas où il y en aurait. L'expérimentation commençait par la réalisation de 2 tours (environ 3.4 km par tour) sans assistance. Les conducteurs réalisaient ensuite 7 tours avec assistance, puis 4 tours sans assistance. Les conducteurs avaient à éviter un véhicule à l'arrêt sur la voie de circulation dans 2 des tours sans assistance et dans 2 des tours avec assistance.

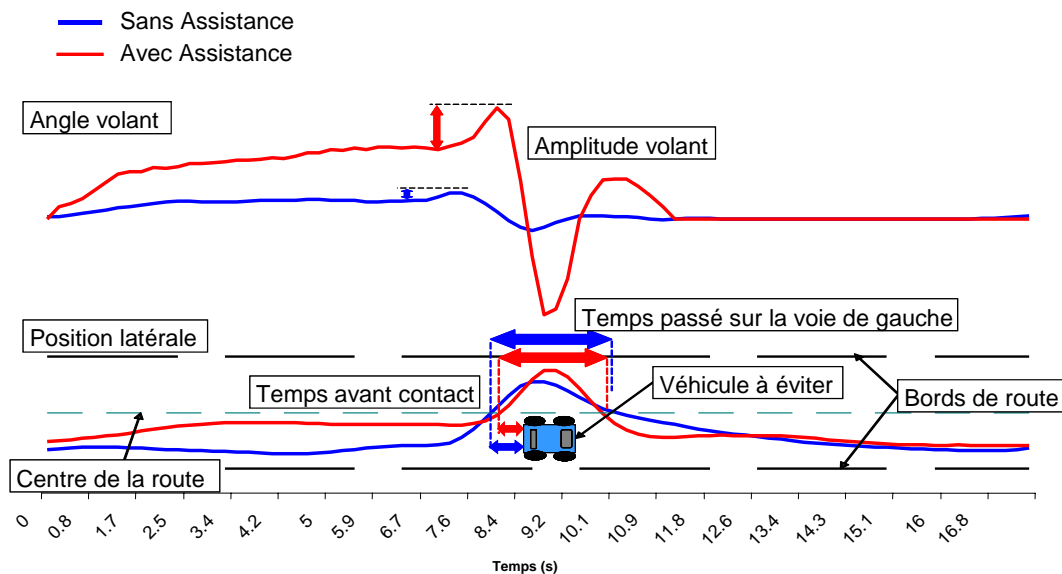


Figure 24 : Exemple d'évitement d'obstacle dans un virage à gauche avec et sans assistance.

Un faisceau de variables montre que les conducteurs sont moins efficaces dans leur manœuvre de contournement de l'obstacle lorsque l'assistance est en fonctionnement (Fig. 24). En effet, les conducteurs entreprennent la manœuvre de correction plus tardivement (réduction du temps avant contact). L'amplitude du mouvement de volant nécessaire à cette manœuvre est largement augmentée, résultant en un écart latéral sur la voie plus important que sans assistance. Enfin, la durée de la manœuvre de contournement est augmentée en conduite avec assistance. Une analyse oculométrique a permis de mettre en évidence que ces difficultés ne trouvent pas leur origine dans une modification des stratégies visuelles. Les difficultés de reprise en main observées sont donc le fait de l'ajout d'une tâche tactique (décision de reprise en main) à la tâche opérationnelle (manœuvre de contournement). Au-delà de la fonction de contrôle latéral, l'examen du mode de délégation de fonction fournit des résultats génériques, qui rejoignent des résultats obtenus sur d'autres fonctions de conduite, en particulier le contrôle longitudinal (adaptations comportementales à l'ACC).

## Synthèse et perspectives

Dans le cadre du mode de contrôle mutuel, l'amorçage moteur améliorent les manœuvres de rétablissement en situation pré-critiques comparativement à tous les types d'avertissement testés. L'effet semble résider dans l'action directe de l'assistance au niveau sensorimoteur plutôt qu'au niveau du diagnostic de la situation. La réponse suggérée est cependant inhibée sans difficulté lorsqu'un diagnostic de haut niveau la contredit. En revanche, les jugements d'acceptabilité ne sont pas corrélés à l'efficacité. Cette dissociation devra être examinée plus précisément et plus largement (acceptabilité individuelle et sociale) à l'avenir, pour déterminer s'il s'agit d'une perte du sentiment de contrôle où d'une mauvaise calibration de l'automate. En ce qui concerne la délégation complète du contrôle latéral à l'automate, les difficultés de reprise en main en situation d'invalidité (contournement d'obstacle) ont été confirmées et affinées. Elles relèvent d'un phénomène de contentement qui ne semble pas se manifester au niveau d'une modification sensible de l'exploration visuelle. Il conviendrait de poursuivre l'analyse de ce phénomène, notamment sur ses aspects liés à l'articulation entre supervision et contrôle, mais aussi quant à ses liens avec une éventuelle réduction de l'attention portée à la tâche de conduite.

## Projet 6 : Développement d'un démonstrateur

---

### **Responsables :**

Sébastien Glaser (LIVIC)

### **Chercheurs impliqués :**

Benoit Lusetti (LIVIC)

Mariana Netto (LIVIC)

Fabien Hernandez (PSA)

Le projet 6 conclue la démarche de recherche par la mise au point d'un démonstrateur sur la base des résultats obtenus dans le cadre du PREVENSOR. Un véhicule de type C3, mis à disposition par PSA et équipé d'un calculateur ouvert pour la commande de la direction électrique, a été utilisé. L'architecture matérielle a été calquée sur celle des véhicules du LIVIC. Plusieurs modes de partage de la conduite sont en cours d'intégration : avertissement, amorçage moteur et mode correctif. Le véhicule sera présenté lors du Carrefour PREDIT du 5 au 7 mai 2008.

# Projet 7 : Développement des moyens de simulation

---

## **Responsables :**

Stéphane Espié (MSIS)

## **Chercheurs impliqués :**

Fabrice Vienne (MSIS)

## **Contexte et objectifs**

Les simulateurs sont devenus peu à peu un moyen d'améliorer les connaissances dans le domaine de la conduite automobile. Les investigations qui peuvent être menées avec ce type d'outil concernent en particulier le comportement du conducteur, la conception des véhicules et celle des infrastructures routières. Les avantages liés aux études sur simulateurs sont nombreux : absence de risque réel et possibilité de produire des situations très critiques, reproductibilité des situations, strict contrôle des paramètres expérimentaux, gain de temps, diminution des coûts d'expérimentation. Leur flexibilité permet, en outre, de tester des situations qui n'existent pas dans la réalité (nouvelle infrastructure ou nouvel équipement) ou n'existent que rarement et de manière aléatoire (conditions de visibilité dégradées par exemple).

Les expérimentations sur simulateur de conduite qui ont été réalisées dans le cadre du projet PREVENSON ont utilisé un mini-simulateur de la famille INRETS-SIM<sup>2</sup>, famille de simulateurs développé notamment au cours du projet fédérateur ARCOS. Des développements complémentaires ont été réalisés afin de répondre aux besoins spécifiques des différentes expérimentations.

Toutes les expérimentations ont utilisé une maquette 3D des pistes de Satory, maquette 3D réalisée initialement dans le cadre du projet Predit MICADO et enrichie dans le cadre du projet fédérateur Predit ARCOS (Figure 25 à 27). Cette maquette figure la piste principale, route bouclée d'une longueur d'environ 3 500 mètres dont la géométrie est respectée. La piste comporte deux lignes droites d'environ 1 000 mètres chacune et des parties sinueuses avec des virages de rayons variés. La maquette 3D a été « texturée » avec des photos prises « sur site », le bâti et la végétation principale sont figurés ce qui a permis d'obtenir une maquette 3D relativement « réaliste » du point de vue visuel. La boucle de rendu visuel de la famille des simulateurs INRETS-SIM<sup>2</sup> utilisée dans le cadre du projet PREVENSON s'appuie sur l'utilisation de la librairie graphique OpenGL/Performer de la société Silicon Graphics (SGI). Ce « moteur » de rendu 3D est un standard « de fait » dans le monde de la simulation de conduite « temps-réel ».

La plupart des expérimentations réalisées ont utilisé un oculomètre, des développements ont été réalisés par MSIS afin de coupler les mesures de l'oculomètre avec les mesures réalisées

sur le simulateur. Il s'agissait, outre la synchronisation des mesures, de calculer la position projetée sur l'écran de visualisation des « icônes » matérialisées dans l'espace 3D.

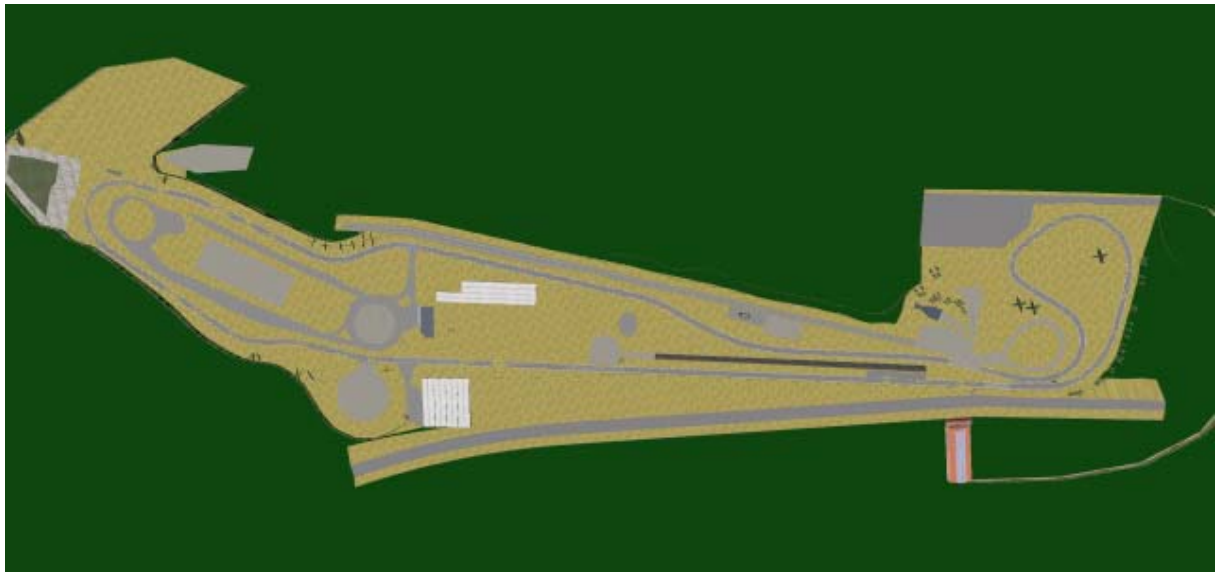


Figure 25 : Vue aérienne



Figure 26 : Aperçu de la ligne droite

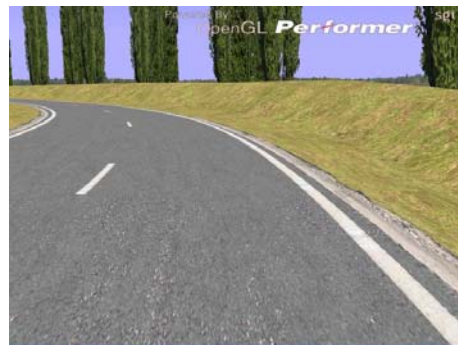


Figure 27 : Aperçu d'un virage

## Travaux réalisés

### *Développements pour le projet 1*

Une première série d'études a porté sur l'utilisation du PT par le conducteur. Ces travaux ont été réalisés à l'IRCCyN. On trouvera dans le chapitre présentant le sous-projet 1 le détail des hypothèses, de la méthodologie utilisée et des résultats acquis.

Les premiers développements réalisés ont porté sur la possibilité de matérialisation du PT dans le visuel du simulateur sous forme « d'icône » : cadre rouge, rectangle bleu ou objet 3D quelconque défini par l'utilisateur et chargé à l'initialisation du visuel (Fig. 28 et 29). La position du « point de corde » est recalculée à chaque instant en fonction de la position de l'observateur (position du véhicule sur la piste). Dans un second temps, des développements complémentaires ont été réalisés pour permettre d'ajouter un biais à la position d'affichage. Ces biais précisés dans un fichier paramètre peuvent consister en :

- décalage avant/arrière sur la droite « tangente »
- décalage avant/arrière du point tangent le long du bord de route
- décalage droite/gauche du point tangent selon la normale à la tangente
- décalage intérieur/extérieur du point tangent selon la normale à la tangente selon sens du virage
- paramétrage de la valeur du décalage en fonction de la distance entre l'observateur et le point tangent (au loin : icône au centre de la voie, proche du véhicule : décalage latéral constant, entre les deux : transition continue)



Fig 28 : Icône cadre rouge



Fig 29 : Icône rectangle bleu

## Développements pour le projet 2

Concernant le simulateur, les développements réalisés ont porté sur l'intégration des méthodes de calcul du TLC fournies par l'IRCCyN. Les développements réalisés n'ont toutefois pas été utilisés dans le cadre du sous-projet 2 du fait de difficultés de mise au point et de contraintes temporelles pour la réalisation des expérimentations. Il est à noter que les problèmes détectés dans l'algorithmique développée ont, depuis, été résolus.

## Développements pour le projet 5

Le sous-projet 5 portait sur l'évaluation des interactions entre conducteur et système d'assistance. Il s'agissait notamment d'étudier les modes contrôle mutuel (avertissement et suggestion d'action) et délégation de fonction (délégation du contrôle latéral à l'automate). On trouvera dans le chapitre présentant le sous-projet 5 le détail des hypothèses, de la méthodologie utilisée et des résultats acquis.

Concernant le simulateur, les développements réalisés ont porté sur quatre points principaux :

*Mise au point de perturbations contrôlés de la trajectoire* : Cette perturbation est censée rendre compte de l'effet d'une bourrasque de vent. La durée et l'intensité de l'effet sont paramétrable par scénario. L'effet consiste en une modification de la position du « point neutre » volant. Cette modification induit, pour le conducteur, la nécessité de corriger l'effort qu'il exerce au volant pour conserver un même cap.

*Évolution des effets haptiques développés dans le cadre du projet fédérateur ARCOS* : Ces évolutions ont porté principalement sur la possibilité de modifier les critères

d'activation/désactivation de la stimulation ainsi que sur l'inversion du « sens » de cette dernière.

*Possibilité de pilotage, par scénario, de dispositifs externes* : Cette fonctionnalité consiste à permettre de déclencher par des signaux « tout ou rien » des dispositifs électro-mécaniques divers. Dans le cadre du sous-projet 5, ces dispositifs consistent en des vibreurs placés directement sur le volant du simulateur. Dans le cadre de ce développement, MSIS a limité son intervention au développement de la fonctionnalité. L'installation des dispositifs « externes » étant à la charge de l'IRRCyN.

*Évolution de l'indicateur de l'état des assistances* : passage d'un mode à deux états (marche / arrêt) à un mode de fonctionnement en trois états (marche / arrêt / en action). Mise à niveau du visuel associé et de l'enregistrement « temps réel ».

## Synthèse et conclusions

---

D'une façon générale, les travaux de PREVENSON ont cherché à améliorer la compatibilité entre le fonctionnement des automates et le fonctionnement humain pour la réalisation du contrôle latéral du véhicule. Cet effort de recherche a été fourni selon quatre axes : (1) améliorer la compréhension des processus perceptivo-moteurs en jeu dans le contrôle de la trajectoire, (2) développer des outils de mesure embarqués pour les indicateurs de la conduite auxquels le conducteur est sensible, (3) synthétiser une fonction de risque de sortie de voie en fonction de ces indicateurs, et (4) rechercher les modes de coopération les plus adaptés entre le conducteur et l'automate. Sur ces questions, les retombées consistent en un enrichissement mutuel de la Psychologie du conducteur et des Sciences de l'ingénieur au niveau des modèles. Les connaissances produites concernent la compréhension du fonctionnement du système homme-machine et non pas chacune de ses composantes, prise isolément.

L'ensemble des travaux semblent converger pour dire que l'angle au point tangent, plus que le TLC, est un indicateur pertinent à la fois pour le conducteur et pour la commande des automates, de par son caractère prédictif des changements de courbure de la route. Ceci s'est traduit notamment par les effets observés sur le contrôle du véhicule lorsque la position du regard des conducteurs relativement au PT était manipulée et par le poids de cet indicateur dans les analyses de régression effectuées dans le cadre de la définition de la fonction de risque. A contrario, quel que soit le mode de calcul du TLC considéré, il semble difficile d'affirmer sur la base des travaux du projet 2 que cet indicateur constitue un indice perceptif utilisé par le conducteur pour contrôler en continu la trajectoire en virage. En revanche, la combinaison de plusieurs TLC mesurés par les capteurs embarqués peut fournir un descripteur des intentions du sujet utilisable pour décider d'alerter ou non le conducteur. Ce descripteur forme la base d'un des quatre modules d'alerte définis dans le cadre de PREVENSON, en lieu et place d'une simple fonction de risque. Les quatre modules de risque ont été conçus de façon à traiter une grande partie des problèmes de sortie de voie si l'on considère le conducteur, son véhicule et la géométrie de l'environnement routier dans lequel ils évoluent. Cependant, la solution adoptée ne se prétend pas universelle. La prise en compte du trafic et de certaines caractéristiques de l'infrastructure dans l'estimation du risque de sortie de voie n'entraient pas dans la fenêtre d'observation de PREVENSON, mais sont des éléments contextuels déterminant dans la conduite.

PREVENSON a également approfondi la compréhension des problèmes liés aux interfaces entre l'homme et la machine. Le projet a défini de nouveaux principes de conception centrés sur le conducteur. On retiendra trois points fondamentaux dans ce domaine. Premièrement, il a été montré que fournir une balise visuelle correctement définie dans sa dynamique spatiale peut être considéré comme une aide au contrôle de la trajectoire en réalité augmentée (afficheurs tête-haute). Il reste à définir les modalités d'intégration d'un tel indicateur dans une interface visuelle plus complexe et à mieux définir les situations d'usage où l'assistance serait la plus efficace. Deuxièmement, il a été montré au travers de l'étude de l'amorçage moteur qu'une stimulation directionnelle haptique au volant peut être plus efficace que tout un ensemble de modalités d'avertissement. Il convient cependant d'essayer de trouver un bon compromis entre l'amélioration du contrôle latéral que permet l'amorçage moteur et son acceptabilité. Enfin, PREVENSON a confirmé les difficultés de reprise en main en situation

d'invalidité associées à la délégation complète du contrôle latéral à l'automate, difficultés qui relèvent d'un phénomène de contentement. Là encore, quel que soit le type de coopération envisagé, des travaux complémentaires remplaçant les dispositifs dans une plus grande complexité routière seraient bienvenus afin de s'approcher de dispositifs opérationnels efficaces dans des conditions réelles de conduite.

# Liste des publications et communications

---

## Articles dans des revues internationales

- Hoc, J.M., Young, M.S., & Blosseville, J.M. (sous presse). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*.
- Mammar S., Glaser S. & Netto M. (2006) Time to Line Crossing for lane departure avoidance : A theoretical study and an experimental Setting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7, 226–241.
- Mars F. (soumis avec révisions) Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*.
- Navarro, J., Hoc, J.M. & Mars, F. (soumis) Delegation of lateral control in car-driving: risk related to complacency. *Safety Science*.
- Navarro, J., Mars, F., Forzy, J.F., El-Jaafari, M. & Hoc, J.M. (en préparation). Assistance to lateral control in car driving: objective and subjective evaluation of motor priming and warning systems.
- Navarro, J., Mars, F. & Hoc, J.M. (2007). Lateral control assistance for car drivers: a comparison of motor priming and warning systems. *Human Factors*, 49, 950-960.

## Communication dans des actes de conférences à comité de lecture

- Coutton-Jean, C., Mestre, D. & Bootsma, R.J. (2006). Finding the visual information used in driving around a bend: An experimental approach. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Enactive Interfaces (ENACTIVE2006)*, pp. 121-122, Montpellier, France, 20-21 Novembre 2006.
- El-Jaafari, M., Forzy, J.F., Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J.M. (sous presse). User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems (HUMANIST2008)*, 8 pp), Lyon, France, 03-04 Avril 2008.
- Glaser, S., Mammar, S., Netto, M., & Lusetti, B. (2005). Experimental Time to Line Crossing Validation. In *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE-ITS2005)*, pp. 791-796, Vienne, Autriche, 13-16 Septembre.
- Glaser, S., Labayrade, R., Mammar, S., Douret J. & Lusetti, B. (2006). Validation of a Vision Based Time to Line Crossing Computation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Vehicles (IEEE-IV2006)*, pp. 200-205, Tokyo, Japon 13-15 Juin 2006.
- Gallen, R., & Glaser, S. (soumis). Comparison of new methods for detection of tangent point in road curves and their assessment, In *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Vehicles (IEEE-IV2008)*, 12 pp.), Eindhoven, Pays-Bas 4-6 Juin 2008.
- Labayrade, R. (2006) How Autonomous Mapping Can Help a Road Lane Detection System? In *Proceedings of the 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'06)*, pp. 1-6), Singapour, 5-8 Decembre 2006.
- Mars F. (2006) Driving in curves with constrained gaze orientation in the vicinity of the tangent point. In *Proceedings of the 11th International Conference on Vision In Vehicles (VIV11)*, 8 pp), Dublin, Ireland, 27-29 Juillet 2006.

- Mars F. (2006) Visual cue enhancement in the vicinity of the tangent point can improve steering in bends. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Enactive Interfaces* (ENACTIVE2006, pp. 175-176), Montpellier, France, 20-21 Novembre 2006.
- Milleville-Pennel, I., & Mahè, A. (2006). Visual anticipation of road departure. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Enactive Interfaces* (ENACTIVE2006, pp. 181-182), Montpellier, France, 20-21 Novembre 2006.
- Navarro J., Mars F., Forzy J.F., El-Jaafari M. & Hoc J.M. (sous presse). Objective and subjective assessment of warning and motor priming assistance devices in car driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society European Chapter Meeting* (EC-HFES2007, 10 pp.), Brunswig, Allemagne, 24-26 Octobre 2007.
- Navarro J., Mars F. & Hoc J.M. (2007) Lateral control support for car drivers: a human-machine cooperation approach. In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2007* (ECCE2007, pp. 249-252), Londres, Royaume Uni, 28-31 Août 2007.
- Navarro J., Mars F. & Hoc J.M. (2006) Evaluation of a motor priming device to assist car drivers. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Enactive Interfaces* (ENACTIVE2006, pp. 187-188), Montpellier, France, 20-21 Novembre 2006.
- Navarro J., Mars F., Hoc J.M., Boisliveau R. & Espié S. (2006) A comparison of warning and motor priming assistance systems for lateral control in car driving. In *Proceedings of the 9th Driving Simulation Conference* (DSCEurope2006, pp. 111-120), Paris, France, 4-6 Octobre 2006.
- Navarro J., Mars F., Hoc J.M., Boisliveau R. & Vienne F. (2006) Evaluation of human-machine cooperation applied to lateral control in car driving. In *Proceedings of the 16th World Congress of the International Ergonomics Association* (IEA2006, pp. 4957-4962), Maastricht, Pays-bas, 10-14 Juillet 2006.

### **Autres communication en conférence**

- Coutton-Jean C., Mestre, D., & Bootsma, R. (2007, novembre). Finding the visual information used in driving around a bend: An experimental approach. Communication présentée à *12<sup>th</sup> International ACAPS Conference*, Leuven, Belgique, 31 Octobre – 2 Novembre 2007.
- Mars, F., Navarro, J., Milleville-Pennel, I. & Hoc, J.M. (2007, septembre). La modélisation de la perception et du contrôle du mouvement au service de la conception des assistances à la conduite automobile. Communication présentée à *4<sup>èmes</sup> Journées d'Etudes en Psychologie Ergonomique* (EPIQUE2007), Nantes, France, 11-13 septembre 2007.
- Navarro, J., Mars, F. & Hoc, J.M. (2007, septembre). La délégation de fonction en conduite automobile du point de vue de la coopération homme-machine. Communication présentée à *4<sup>èmes</sup> Journées d'Etudes en Psychologie Ergonomique* (EPIQUE2007), Nantes, France, 11-13 septembre 2007.