



HAL
open science

Coopération homme-machine multi-niveau entre le conducteur et un système d'automatisation de la conduite

Mohamed Amir Benloucif

► **To cite this version:**

Mohamed Amir Benloucif. Coopération homme-machine multi-niveau entre le conducteur et un système d'automatisation de la conduite. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2018. Français. NNT : 2018VALE0012 . tel-01860221

HAL Id: tel-01860221

<https://theses.hal.science/tel-01860221>

Submitted on 23 Aug 2018

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

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



Université
de Valenciennes
et du Hainaut-Cambésis



Thèse de doctorat
Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

Spécialité : Automatique, Génie Informatique

Présentée et soutenue par Mohamed Amir, BENLOUCIF.

Le 06/04/2018, à Valenciennes

Ecole doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire : Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH-UMR CNRS 8201)

COOPERATION HOMME-MACHINE MULTI-NIVEAU ENTRE LE
CONDUCTEUR ET UN SYSTEME D'AUTOMATISATION DE LA
CONDUITE

JURY

Président du jury

— Merienne, Frédéric. Pr, Arts et Métiers ParisTech.

Rapporteurs

— Bonnifait, Philippe. Pr, Université de Technologie de Compiègne.

— Moreau, Xavier. Pr, Université de Bordeaux.

Examineurs

— Merienne, Frédéric. Pr, Arts et Métiers ParisTech.

— Jonville, Patricia. Directrice adjointe Programme Eco-Mobilité, Institut VEDECOM.

Directeur de thèse

— Popieul, Jean-Christophe. Pr, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambésis.

Co-directeur de thèse : Sentouh, Chouki. Mcs, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambésis.

Membres invités

— Marteau, Jean-Yves. Groupe Peugeot-Citroën

— Tissot, Jean-Marc. Expert ergonome, Valeo

Résumé

Les récentes percées technologiques dans les domaines de l'actionnement, de la perception et de l'intelligence artificielle annoncent une nouvelle ère pour l'assistance à la conduite et les véhicules hautement automatisés. Toutefois, dans un contexte où l'automatisation demeure imparfaite, il est primordial de s'assurer que le système d'automatisation de la conduite puisse maintenir la conscience de la situation du conducteur afin que ce dernier puisse accomplir avec succès son rôle de supervision des actions du système. En même temps, le système doit pouvoir assurer la sécurité du véhicule et prévenir les actions du conducteur qui risqueraient de compromettre sa sécurité et celle des usagers de la route. Il est donc nécessaire d'intégrer dès la conception du système automatisé de conduite, la problématique des interactions avec le conducteur en réglant les problèmes de partage de tâche et de degré de liberté, d'autorité et de niveau d'automatisation du système.

S'inscrivant dans le cadre du projet ANR-CoCoVeA (Coopération Conducteur-Véhicule Automatisé), cette thèse se penche de plus près sur la question de la coopération entre l'automate de conduite et le conducteur. Notre objectif est de fournir au conducteur un niveau d'assistance conforme à ses attentes, capable de prendre en compte ses intentions tout en assurant un niveau de sécurité important. Pour cela nous proposons un cadre général qui intègre l'ensemble des fonctionnalités nécessaires sous la forme d'une architecture permettant une coopération à plusieurs niveaux de la tâche de conduite. Les notions d'attribution des tâches et de gestion d'autorité avec leurs différentes nuances sont abordées et l'ensemble des fonctions du système identifiées dans l'architecture ont été étudiées et adaptées pour ce besoin de coopération. Ainsi, nous avons développé des algorithmes de décision de la manœuvre à effectuer, de planification de trajectoire et de contrôle qui intègrent des mécanismes leur permettant de s'adapter aux actions et aux intentions du conducteur lors d'un éventuel conflit.

En complément de l'aspect technique, cette thèse étudie les notions de coopération sous l'angle des facteurs humains en intégrant des tests utilisateur réalisés sur le simulateur de conduite dynamique SHERPA-LAMIH. Ces tests ont permis à la fois de valider les développements réalisés et d'approfondir l'étude grâce à l'éclairage qu'ils ont apporté sur l'intérêt de chaque forme de coopération.

Mots Clés : Conduite automatisée, aide à la conduite, architecture de coopération Homme-Machine, contrôle partagé, prise de décision, détection de l'intention, planification de trajectoire coopérative, facteurs humains, simulation de conduite.

Abstract

The recent technological breakthroughs in the actuation, perception and artificial intelligence domains herald a new dawn for driving assistance and highly automated driving. However, in a context where the automation remains imperfect and prone to error, it is crucial to ensure that the automated driving system maintains the driver's situation awareness in order to be able to successfully and continuously supervise the system's actions. At the same time, the system must be able to ensure the safety of the vehicle and prevent the driver's actions that would compromise his safety and that of other road users. Therefore, it is essential that the issue of interaction and cooperation with the driver is addressed throughout the whole system design process. This entails the issues of task allocation, authority management and levels of automation.

Conducted in the scope of the projet ANR-CoCoVeA (French acronym for : "*Cooperation between Driver and Automated Vehicle*"), this thesis takes a closer look at the question of cooperation between the driver and automated driving systems. Our main objective is to provide the driver with a suitable assistance level that accounts for his intentions while ensuring global safety. For this matter, we propose a general framework that incorporates the necessary features for a successful cooperation at the different levels of the driving task in the form of a system architecture. The questions of task allocation and authority management are addressed under their different nuances and the identified system functionalities are studied and adapted to match the cooperation requirements. Therefore, we have developed algorithms to perform maneuver decision making, trajectory planning, and control that include the necessary mechanisms to adapt to the driver's actions and intentions in the case of potential conflicts.

In addition to the technical aspects, this thesis studies the cooperation notions from the human factor perspective. User test studies conducted on the SHERPA-LAMIH dynamic simulator allowed for the validation of the different developpements while shedding light on the benefits of different cooperation forms.

Keywords : Automated driving, driving assistance, architecture for Human-Machine cooperation, shared control, decision making, intent recognition, cooperative trajectory planning, human factors, driving simulation.

Remerciements

Ce manuscrit de thèse est le résultat d'années de travail acharné, de doute et surtout de persévérance. Au-delà de l'expertise technique et du bagage scientifique qu'elle m'a conféré, cette expérience m'a fait grandir et m'a beaucoup appris sur moi-même. Elle était riche en enseignements qui, je crois, me seront précieux à l'avenir. Face à l'ampleur de la tâche, l'aboutissement d'une thèse n'est jamais le fruit d'un travail individuel. Je souhaite donc par ces quelques mots exprimer ma gratitude aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à cette réussite.

Je ne pourrai jamais assez remercier mon directeur de thèse Jean-Christophe POPIEUL et mon encadrant Chouki SENTOUH pour m'avoir permis de mener cette aventure. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée, la liberté que vous m'avez laissée et les qualités humaines que j'ai beaucoup appréciées.

Un très grand merci à mes rapporteurs Xavier MOREAU et Philippe BONNIFAIT pour avoir accepté de réaliser une lecture attentive et pointue de ce manuscrit. Je remercie également très chaleureusement Frédéric MERIENNE, Jean-Yves MARTEAU, Patricia JONVILLE et Jean-Marc TISSOT de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire d'Automatique, Mécanique et Informatique industrielle et Humaine (LAMIH UMR-CNRS 8201). Je tiens donc à remercier son directeur Thierry-Marie GUERRA ainsi que l'ensemble du personnel qui a permis d'y travailler dans d'excellentes conditions. Merci à Isabelle OLIVEIRA dont le sourire bienveillant a souvent illuminé de rudes journées, à Mélanie LECQ, Josèphe BROUTIN et Sylvie RUBENS pour leur aide précieuse et leur professionnalisme, à Thierry POULAIN pour la bonne humeur qu'il répand autour de lui, à Serge DEBERNARD, Marie-Pierre PACAUX-LE-MOINE, Bruno LAURENT et bien d'autres.

J'accorde une pensée particulière à Jérôme FLORIS, le magicien du simulateur, ainsi que Philippe SIMON avec qui j'ai beaucoup apprécié travailler et que je remercie chaleureusement pour leur disponibilité et l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

Un immense merci à Ben et Molly, mes amis et compagnons de route, qui grâce à leur soutien indéfectible m'ont amené jusqu'au bout.

Je tiens particulièrement à remercier du fond du cœur Mina pour ses encouragements, son intérêt et les soirées consacrées aux relectures du manuscrit.

Je remercie les copains du bureau Djamel, Salvatore, Lydia, Chunshi, Yassine et Viet ainsi que Anh-Tu, Raton, Anis, Marko, Ismat, Ayoub, Walid, Tariq, Maroi et autres amis et collègues pour les moments partagés et qui ont été un rempart face à la morosité des journées grisonnantes du nord.

Merci aux qiqis : Hichem, Abderrezak, Boulma et Pika pour leur patience, leur compréhension et leur soutien lors des nombreuses fois où j'ai dû travailler durant nos voyages.

A mes parents, Lamine et Nabila, à qui je dois tout, à ma sœur Seloua et à mon frère Yacine qui, j'espère en lisant ces lignes, sauront retrouver toute ma gratitude, et comprendre certains moments où il m'était difficile d'être très présent. Face à ce que ressens, un merci ne sera jamais assez.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	7
Table de figures	13
Liste des tableaux	19
Introduction générale	21
1 Vers une automatisation élevée de la conduite	27
1.1 Introduction	27
1.2 Vers une automatisation élevée de la conduite	27
1.2.1 Accidentologie et besoin d'assistance	27
1.2.2 Mesures pour l'amélioration de la sécurité routière	28
1.2.2.1 Les facteurs liés à l'humain	29
1.2.2.2 Les facteurs liés à l'infrastructure	30
1.2.2.3 Les facteurs liés aux véhicules	30
1.2.2.3.1 Sécurité passive	31
1.2.2.3.2 Sécurité active	31
1.3 Systèmes avancés d'aide à la conduite	32
1.3.1 Évolution des systèmes d'aide à la conduite	33
1.3.1.1 Première génération des ADAS	33
1.3.1.2 Deuxième génération des ADAS	33
1.3.1.3 ADAS actifs	35
1.3.2 Niveaux d'automatisation de la conduite	36
1.4 Projets sur l'automatisation de la conduite	39
1.4.1 Pourquoi « automatisé » au lieu de « autonome » ?	39
1.4.2 Les premières initiatives pour l'automatisation de la conduite	39
1.4.3 Les projets sur l'automatisation de la conduite en Europe	41
1.5 Les problèmes liés à l'automatisation	45
1.6 Conclusion	47

2	Architecture pour la coopération Homme-Machine multi-niveau	49
2.1	Introduction	49
2.2	La coopération Homme-Machine	49
2.3	Application au domaine automobile	56
2.3.1	Modélisation de la conduite	57
2.3.2	Les niveaux d'automatisation	62
2.3.3	La coopération Multi-niveau	64
2.3.4	La gestion des interférences à travers les niveaux de la conduite	65
2.3.4.1	Au niveau stratégique	65
2.3.4.2	Au niveau tactique	66
2.3.4.3	Au niveau opérationnel	67
2.4	Architecture pour la coopération multi-niveau	68
2.4.1	Généralités	69
2.4.2	Niveau stratégique	69
2.4.3	Niveau tactique	69
2.4.4	Niveau opérationnel	72
2.5	Cas d'usage pour l'étude de la coopération Homme-Machine Multi-niveau	75
2.6	Conclusion	76
3	Fonctions de haut niveau pour la coopération	77
3.1	Introduction	77
3.2	Gestion de l'autorité	78
3.2.1	Introduction	78
3.2.2	Sélection du mode de fonctionnement du système	79
3.2.3	Gestion de l'autorité sur les différents niveaux de la tâche de conduite	80
3.2.4	La supervision du conducteur	83
3.3	Détection de l'intention d'un changement de voie	87
3.3.1	Introduction	87
3.3.2	État de l'art	87
3.3.3	Règles permettant de reconnaître les manoeuvres du conducteur	89
3.3.4	Module de détection de l'intention du conducteur basé sur la logique floue	94
3.3.4.1	Introduction à la logique floue	94
3.3.4.2	Architecture du module de détection d'intention	100
3.3.4.3	Construction de la base de règles d'inférence	103
3.3.4.4	Résultats expérimentaux	103
3.4	Prise de décision sur la manoeuvre	106
3.4.1	Introduction	106
3.4.2	État de l'art	106
3.4.3	Approche de prise de décision sur la manoeuvre	108
3.4.3.1	Génération des stratégies candidates	109
3.4.3.2	Prédiction de la scène de trafic	110
3.4.3.3	Évaluation de la stratégie de conduite	112
3.4.3.4	Classement des stratégies	116
3.4.3.5	Vérification de la faisabilité	118

3.4.4	Résultats expérimentaux et de simulation	118
3.4.4.1	Résultats de simulation du modèle de prédiction IDM	118
3.4.4.2	Résultats de l'évaluation du risque	118
3.4.4.3	Résultats de la prise de décision	120
3.5	Conclusion	124
4	Fonctions de bas niveau pour la coopération	125
4.1	Introduction	125
4.2	Approche pour la planification de trajectoire coopérative	126
4.2.1	Introduction	126
4.2.2	État de l'art	127
4.2.3	Approche de planification de la trajectoire	129
4.2.3.1	Les fonctions polynomiales comme base pour la planification de trajectoire sur autoroute	132
4.2.3.2	Génération d'un ensemble de trajectoires candidates	134
4.2.3.3	Évaluation des trajectoires	138
4.2.3.4	Résultats expérimentaux	146
4.3	La commande latérale pour le contrôle partagé	149
4.3.1	Introduction	149
4.3.2	La structure de commande latérale adoptée	149
4.3.3	Modélisation du système Conducteur Véhicule Environnement	150
4.3.3.1	Modèle du véhicule	150
4.3.3.2	Modèle du conducteur	154
4.3.4	Synthèse de la commande	157
4.3.5	Résultats	164
4.3.5.1	Résultats de la conduite entièrement automatisée (contrôleur LK)	164
4.3.5.2	Influence du contrôleur DA	165
4.3.5.3	Résultats avec la structure de contrôle partagé lors de la mo- dification en ligne de la variable d'autorité	166
4.4	Conclusion	168
5	Évaluation expérimentale des concepts de coopération	169
5.1	Introduction	169
5.2	Simulateur de conduite SHERPA-LAMIH	170
5.3	Etude 1 : L'adaptation en temps-réel du degré d'autorité haptique (LoHA)	171
5.3.1	Introduction	171
5.3.2	Méthode	172
5.3.2.1	Matériels	172
5.3.2.2	Les systèmes <i>LKA</i> et <i>ALKA</i>	172
5.3.2.3	Participants	173
5.3.2.4	Protocole	173
5.3.2.5	Analyse de données	175
5.3.3	Résultats	176
5.3.3.1	Les résultats objectifs	176

5.3.3.2	Les résultats subjectifs	180
5.3.4	Discussions	181
5.3.5	Conclusion	184
5.4	Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)	186
5.4.1	Introduction	186
5.4.2	Méthode	186
5.4.2.1	Matériels	186
5.4.2.2	Participants	186
5.4.2.3	Protocole	186
5.4.2.4	Analyse de données	187
5.4.3	Résultats	188
5.4.3.1	Les résultats objectifs	188
5.4.3.2	Les résultats subjectifs	190
5.4.4	Discussions	192
5.4.5	Conclusion	195
5.5	Conclusion générale	197
5.6	Perspectives	200
	Conclusion générale et perspectives	197
	Références	203

Liste des abréviations

<i>ACC</i>	Adaptive Cruise Control
<i>LKS</i>	Lane Keeping System
<i>ALKA</i>	Adaptive Lane Keeping Assist
<i>CVE</i>	Conducteur-Véhicule-Route
<i>EfC</i>	Effort Consistency
<i>LCA</i>	Lane Change Assist
<i>LKA</i>	Lane Keeping Assist
<i>LoHA</i>	Level of Haptic Authority
<i>MLP</i>	Mean Lateral Position
<i>No ST</i>	No Secondary Task
<i>RMSE</i>	Root Mean Square Error
<i>SRR</i>	Steering wheel Reversal Rate
<i>ST</i>	Secondary Task
<i>STDLP</i>	STandard Deviation of Lateral Position
<i>StE</i>	Steering Effort
<i>StR</i>	Steering Resistance
<i>TiC</i>	Time Consistency

Table des figures

1.1	Evolution de la mortalité routière en France métropolitaine et mesures prises en matière de sécurité 1970 – 2014 (moyenne glissante).	28
1.2	Les facteurs contribuant aux accidents de la route [1]	29
1.3	Système d’assistance à la vision de nuit Audi A8.	34
1.4	ADAS Roadmap (source : [2])	37
1.5	Niveaux d’automatisation définis par l’OICA (Source : [3]).	38
1.6	La famille des Navlab 1-10.	40
1.7	Stanley (figure à droite). Boss (figure à gauche)	41
1.8	Le prototype de Google de la voiture autonome	43
2.1	Extension des niveaux d’automatisation sur différentes étapes du traitement de l’information (source : [4])	53
2.2	: Les différents niveaux de l’activité présentés par Rasmussen [5]	55
2.3	: La répartition hiérarchique de l’activité de conduite selon Michon [6]	58
2.4	: Modèle de la tâche de guidage de McRuer ([7])	59
2.5	: Modèle hiérarchique du risque de Van Der Molen et Bötticher ([8])	61
2.6	Niveaux d’interaction entre le conducteur et le véhicule automatisé	64
2.7	Architecture pour la coopération Multi-niveau	73
2.8	Détails du module de prise de décision sur la manœuvre	74
2.9	Les différentes possibilités de coopération pour une scénario de conduite sur autoroute	75
3.1	Architecture de contrôle simplifiée : Fonctions de haut niveau pour la coopération Homme-machine (cadre vert)	78
3.2	Algorithmes de gestion de l’autorité sur les différents niveaux de la conduite abordés-	82
3.4	La variable DS ($\alpha = 8.5$; $\beta = 8$; $\epsilon = 0.1$)	85
3.3	Graphe de fonctionnement du système	86
3.5	Représentation de l’environnement pour la détection d’intention	90
3.6	Partitionnement d’une variable continue v_y	96
3.7	Exemple d’une proposition floue et déduction du degré de vérité	97
3.8	Exemple d’une inférence sur deux règles floues	100
3.9	Système de détection de l’intention basé sur la logique floue	100
3.11	Partitionnement de la sortie de décision sur l’intention du conducteur	101
3.10	Partitionnement des variables d’entrée du module de détection de l’intention	102

3.12	Résultats de la détection d'intention	104
3.13	Structure du module de prise de décision de la manoeuvre	108
3.14	Représentation de l'environnement de l'ego véhicule pour la prise de décision	111
3.15	Représentation des véhicules sur la voie adjacente pour l'évaluation du risque de changement de voie	113
3.16	Fonction de risque : probabilité de collision en fonction de l'espacement	115
3.17	Grille de manoeuvre pour l'interaction haut niveau avec le conducteur	117
3.18	Simulation du modèle IDM ($a = 1.8 \text{ m.s}^{-2}$, $b = 1.8 \text{ m.s}^{-2}$, $\beta = 4$, $D_0 = 2 \text{ m}$, $T = 2 \text{ s}$)	119
3.19	Résultats de l'estimation du risque de changement de voie vers la gauche	120
3.20	Scène de trafic à différents instants du scénario de test représentant l'évolution de l'ego-véhicule au sein d'une situation de trafic aléatoire	122
3.21	Évolution durant le scénario des : (a) fonctions de coût pour chaque voie; (b) Vitesses de l'ego-véhicule et des véhicules leaders sur chaque voie	123
4.1	Architecture de contrôle simplifiée : Fonctions de bas niveau pour la coopération Homme-machine (cadre vert)	126
4.2	Représentation d'une trajectoire dans le repère de Frenet	130
4.3	Transformation de la trajectoire du repère Route vers le repère global	132
4.4	Illustration du calcul d'une trajectoire polynomiale	133
4.5	Génération d'un ensemble de trajectoires en variant les conditions aux limites	136
4.6	Cohérence temporelle lors de la planification cyclique de trajectoire	137
4.7	Comparaison des normes 1 et 2 en illustrant le comportement pour des petites déviations et celle pour des grandes déviations	140
4.8	Vue détaillée du bloc de planification locale	140
4.9	Prédiction du déplacement latéral sur un horizon τ_p en utilisant le modèle cinématique CTRV	141
4.10	Position latérale prédite pour un déplacement latéral de 1,75m ($\tau_p = 1\text{s}$)	142
4.11	Représentation du véhicule par des cercles internes	144
4.12	Vérification d'une collision entre deux véhicules à un instant t_0	145
4.13	Simulation 1 : La trajectoire planifiée avec un couple du conducteur de forme sinusoïdale de période 8 s	147
4.14	Simulation 1 : Position, vitesse et accélération latérales planifiées	147
4.15	Simulation 2 : La trajectoire planifiée avec un couple du conducteur de forme sinusoïdale de période 4 s	148
4.16	Simulation 2 : Position, vitesse et accélération latérales planifiées	148
4.17	Représentation du modèle bicyclette	151
4.18	Représentation du modèle de la colonne de direction	153
4.19	Les angles visuels pour les comportements anticipatoire et compensatoire	155
4.20	Schéma synoptique du modèle conducteur utilisé	156
4.21	(a) Circuit de test Satory; (b) Couple du système (T_{LK}); (c) Erreur de positionnement latéral; (d) Erreur de Cap; (e) Angle au volant; (f) Vitesse de lacet	165
4.22	(a) Trajectoire latérale du véhicule pour un écart vers la gauche (b) Couples du conducteur et du contrôleur pendant la manoeuvre	166

4.23	(a) Trajectoire latérale du véhicule dans la voie ; (b) Variable d'autorité σ ; (c) Couples du conducteur et du système au niveau du volant	167
5.1	Le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH	170
5.2	Positionnement de la tablette pour la tâche secondaire	172
5.3	Illustration du scénario de test lorsque les conducteurs arrivaient sur le PMV	175
5.4	Résultats objectifs : Moyenne sur les participants du (a) SRR ; (b) STDLP ; (c) MLP ; (d) RMSE et la performance de la conduite autonome et de la LKA seule. Les barres d'erreur représentent l'écart-type	177
5.5	L'effort de guidage (StE) pour les différentes conditions. Les barres d'erreur représentent l'écart-type	180
5.6	La performance de la tâche secondaire (STP). Les barres d'erreur représentent l'écart-type	180
5.7	Résultats subjectifs : Comparaison entre Manuel, LKA et ALKA dans la phase : (a) sans tâche secondaire ; (b) avec la tâche secondaire	181
5.8	Scénario : Évitement de collision avec des véhicules arrêtés de part et d'autre de la voie	186
5.9	Résultats objectifs de l'interaction au niveau du volant : Moyennes et écarts types de la : (a) Cohérence temporelle (TiC), (b) Cohérence de l'effort (EfC), (c) Effort de braquage (StE) et (d) Effort de résistance (StR)	189
5.10	Moyennes et écarts types du SRR sous les différentes stratégies	190
5.11	Résultats subjectifs rapportant les sentiments de : (a) Contrôle, (b) Confort et (c) Facilité des évitements	191
5.12	Évaluation subjective de la performance de conduite globale avec les différentes stratégies durant le scénario de test	192
5.13	(a) Couples de braquage (b) Position latérale réalisée et planifiée du système sous la condition <i>Manual</i> pour le sujet 1	193
5.14	(a) Couple de braquage du conducteur et (b) Position latérale réalisée sous la condition <i>No Shared</i> pour le sujet 1	194
5.15	(a) Couples de braquage et (b) Position latérale réalisée et planifiée du système sous la condition <i>Shared</i> pour le sujet 1	195

Liste des tableaux

2.1	Les niveaux d'automatisation de décision et de sélection d'action.	52
3.1	Paramètres de l'algorithme	93
3.2	La performance de détection durant la phase de conduite manuelle	93
3.3	Comparatif de la performance de détection avec les deux algorithmes	94
3.4	Règles floues pour l'intention du changement de voie vers la gauche (valeur linguistique de la sortie LCL (voir §3.3.4.2))	103
4.1	Paramètres de l'algorithme de planification de trajectoire	146
4.2	Paramètres du modèle <i>CVE</i>	164
5.1	Résultats de l'ANOVA pour les indicateurs subjectifs	181

Introduction générale

Le nombre d’usagers de la route a connu un accroissement considérable au cours des dernières décennies. Face à cela, de nombreux défis se sont imposés concernant la sécurité routière et les problèmes économiques qui en découlent.

Aujourd’hui, les récentes percées technologiques dans le domaine de l’actionnement, de la perception et de l’intelligence artificielle annoncent une nouvelle ère pour l’assistance à la conduite et les véhicules hautement automatisés. Ces technologies apportent la promesse d’améliorer la sécurité, notamment, en réduisant l’erreur humaine qui est la principale cause d’accidents de la route.

Toutefois, l’expérience a montré que ces systèmes soulevaient de nouvelles problématiques. En effet, la complexité croissante au sein de l’habitacle change la nature de la tâche de conduite et modifie profondément l’activité du conducteur, et cela souvent d’une manière imprévue et inattendue par le concepteur. En plus de la supervision de la tâche de conduite, le conducteur se voit ajouter la tâche de superviser l’activité de l’agent artificiel. Par conséquent, la conception de l’interaction avec le conducteur nécessite une attention particulière afin de garantir une bonne coopération et assurer une harmonisation des actions des deux agents qui désormais partagent la conduite du véhicule.

Problématique

Dans un contexte où l’automatisation demeure imparfaite, il est primordial de s’assurer que le système d’automatisation de la conduite puisse maintenir la conscience de la situation du conducteur afin que ce dernier puisse accomplir avec succès son rôle de supervision des actions du système. En même temps, le système doit pouvoir assurer la sécurité du véhicule et prévenir les actions du conducteur qui risquent de compromettre sa sécurité et celle des usagers de la route. Il est donc nécessaire d’intégrer dès la conception du système, la problématique des interactions avec le conducteur en réglant les problèmes de partage de tâche et de degré de liberté, d’autorité et de niveau d’automatisation du système.

Cette problématique a été mise en évidence par le passé dans plusieurs projets traitant de l'automatisation de la conduite à l'exemple du projet ANR-ABV (2009-2013). Toutefois, ces études ne s'adressent généralement qu'à une partie du problème et les solutions proposées ne tiennent pas compte de la tâche de conduite dans sa globalité.

Cette limitation a fait l'objet du projet ANR-CoCoVeA (Coopération entre Conducteur et Véhicule Automatisé) (2013 - 2017) qui propose une intégration centrée sur l'homme de différents types de systèmes en tenant compte de la complexité croissante du domaine automobile. L'objectif majeur du projet est la réduction des risques d'interactions néfastes entre les différents systèmes embarqués et le conducteur afin de réduire le risque d'accident. A cet effet, il y a été entrepris de développer le système d'assistance en intégrant les contraintes liées à la coopération avec le conducteur dès les phases amont de la conception dans une démarche d'**automatisation centrée sur l'homme**. Cette vision repose fortement sur la notion de partage du contrôle du véhicule entre conducteur et automate, technique dont les bases ont été posées lors de projets précédents.

Dans ce cadre, cette thèse se penche de plus près sur la question de la coopération entre le véhicule automatisé et le conducteur à bord. Elle tente d'adapter les grands principes de coopération Homme-Machine aux spécificités du domaine automobile. Pour ce faire, nous nous sommes penchés sur la question de la structuration de la coopération en prenant en compte :

1. Les interactions à différents niveaux hiérarchiques de la tâche de conduite
2. La gestion des conflits entre conducteur et automate
3. Le transfert d'autorité entre conducteur et automate

Notre objectif est de fournir au conducteur un niveau d'assistance conforme à ses attentes, capable de prendre en compte ses intentions tout en assurant un niveau de sécurité important.

Dans le but de saisir la complexité de la question, il est nécessaire de recourir aux études de modélisation de la conduite. Celles-ci soulignent l'aspect hiérarchique de la tâche de conduite. Nous proposons donc une architecture qui structure la coopération sur ces différents niveaux (stratégique, tactique et opérationnel) en réunissant non seulement les différentes fonctions essentielles à la conduite hautement automatisée mais également les mécanismes de gestion de conflits à chaque niveau.

Les notions d'attribution des tâches et de gestion d'autorité avec leurs différentes nuances sont abordées et l'ensemble des fonctions du système identifiées dans l'architecture ont été étudiées et adaptées pour ce besoin de coopération. Ainsi, nous avons développé des

algorithmes de décision de la manœuvre à effectuer, de planification de trajectoire et de contrôle qui intègrent des mécanismes leur permettant de s'adapter à tout moment aux actions et aux intentions du conducteur.

En complément de l'aspect technique, cette thèse étudie les notions de coopération sous l'angle des facteurs humains en intégrant des tests utilisateur réalisés sur le simulateur de conduite dynamique SHERPA-LAMIH. Ces tests ont permis à la fois de valider les développements réalisés et d'approfondir l'étude grâce à l'éclairage qu'ils ont apporté sur l'intérêt de chaque forme de coopération.

Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

Chapitre 1 Vers une automatisation élevée de la conduite : Ce chapitre fait l'état de l'art des systèmes avancés d'aide à la conduite et des systèmes d'automatisation de la conduite qu'on connaît aujourd'hui. Les limitations de ces systèmes et le rôle que détient toujours le conducteur dans la tâche de conduite permettra de mettre en avant le besoin de coopération entre le conducteur et l'automate afin d'éviter des pièges liés à l'automatisation (sur-confiance, perte de la conscience de la situation, dégradation de la performance ...), problèmes qui risquent de compromettre l'aspect sécuritaire que l'automatisation entend apporter initialement.

Chapitre 2 Architecture pour la coopération Homme-Machine multi-niveau : Dans le but de proposer un cadre qui structure cette coopération, le chapitre 2 présente la réflexion menée afin d'aboutir à une architecture fonctionnelle destinée à supporter la coopération entre le conducteur et le système. Les principes de la coopération homme-machine seront exposés dans un cadre général avant d'être détaillés pour le cas de la conduite automobile. En réunissant des éléments issus de la modélisation de la conduite et les principes de la coopération Homme-Machine, l'architecture du système coopérant d'automatisation de la conduite sera construite.

Chapitre 3 Fonctions de haut niveau pour la coopération : Ce chapitre présente les modules de haut niveau de l'architecture. La fonction de ces modules relève de la prise de décision où alimente directement un module de décision. Par conséquent, trois modules sont abordés : Le module de gestion d'autorité, le module de détection de l'intention et le

module de prise de décision sur la manœuvre.

Chapitre 4 Fonctions de bas niveau pour la coopération : Ce chapitre est consacré aux fonctions situées dans la couche exécutive de la tâche de conduite et qui sont régies par les mécanismes de haut niveau présentés précédemment. Il abordera deux modules importants du bas niveau qui permettent la coopération dans la réalisation de la trajectoire planifiée et dans l'action du système.

Contrairement aux approches de planification classiques, le module de planification de trajectoire présenté intègre une fonctionnalité coopérative qui permet d'adapter la trajectoire du système en temps réel pour accommoder les actions du conducteur dans la mesure où celles-ci respectent la dynamique du véhicule et ne mènent pas vers des collisions.

L'architecture de contrôle latéral présentée permet au système de coopérer avec le conducteur au niveau opérationnel. Elle intègre une approche de commutation entre deux contrôleurs locaux qui représentent à chacun un objectif de contrôle particulier et dont la synthèse se base sur la théorie du contrôle optimal.

Chapitre 5 Évaluation expérimentale des concepts de coopération : Ce chapitre est consacré aux tests utilisateur d'évaluation des principes de la coopération proposés. Il comprend deux études pour évaluer d'une part la possibilité de varier en temps réel l'autorité du système au niveau opérationnel et d'autre part, la possibilité d'adapter la trajectoire en temps réel pour résoudre un conflit au niveau du volant.

Conclusion et perspectives : Ce chapitre récapitule la démarche suivie dans ce mémoire pour l'élaboration d'un système d'automatisation de la conduite coopérant avec le conducteur et conclut sur les résultats obtenus. Il se termine en proposant des perspectives à ce travail pour de futures recherches.

Liste des publications

Revues internationales avec comité de lecture

- Sentouh C., Nguyen T., Benloucif M., Popieul J.-C. (2018). Driver-Automation Cooperation Oriented Approach for Shared Control of Lane Keeping Assist Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Volume : PP, Issue : 99, (In Press), DOI=10.1109/TCST.2018.2842211.
- Benloucif, M.A., Sentouh, C., Floris, J., Simon, P., Popieul, J.-C. (2017). Online adaptation of the Level Of Haptic Authority in a lane keeping system considering the driver's state. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2017, ISSN 1369-8478, (<https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.08.013>).

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- Benloucif, M. A., Nguyen, A. T., Sentouh, C., & Popieul, J. C. (2017). A New Scheme for Haptic Shared Lateral Control in Highway Driving Using Trajectory Planning. *In IFAC World Congress, 2017, IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13834-13840.
- Benloucif, M. A., Popieul, J. C., & Sentouh, C. (2016). Architecture for multi-level cooperation and dynamic authority management in an Automated Driving System-A case study on lane change cooperation. *IFAC Human Machine Systems, 2016, IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 615-620.
- Benloucif, M. A., Popieul, J. C., & Sentouh, C. (2016, June). Multi-level cooperation between the driver and an automated driving system during lane change maneuver. *In Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016 IEEE (pp. 1224-1229). IEEE.
- Benloucif M., Sentouh C., Floris J., Simon P., Boverie S., Popieul J. (2016). Cooperation between the driver and an automated driving system taking into account the driver's state. *Driving Simulation and Virtual Reality Conference and Exhibition*, 2016,

Arts et Métiers Paris Tech, Paris, France, septembre.

Livrables de projet et rapports techniques

- Benloucif A., Feron S., Sentouh C., Valaix P. (2014). Rapport de présentation des configurations de références et des scénarios d’usages types. Projet ANR-TDM COCOVEA (« Coopération Conducteur - Véhicule Automatisé »), livrables 2100&L2200, décembre.

- Sentouh C., Benloucif M., Debernard S., Simon P., Floris J., Pacaux-lemoine M., Popieul J. (2015). Spécifications du partage de la commande et des besoins informationnels. Projet ANR COCOVEA (COopération COnducteur - VEhicule Automatisé), livrable L3100, LAMIH, janvier.

- Sentouh C., Benloucif M., , Floris J., Simon P., Popieul J. (2017). Algorithmes de modulation du niveau d’automatisation. Projet ANR COCOVEA (COopération COnducteur - VEhicule Automatisé), livrable L3200, LAMIH, juin.

Chapitre 1

Vers une automatisation élevée de la conduite

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'exposer les enjeux et le contexte qui ont accompagné l'émergence des systèmes avancés d'aide à la conduite en général et les systèmes d'automatisation de la conduite en particulier. Il retrace l'évolution des systèmes d'aide au conducteur pour ensuite faire l'état des lieux des grands projets ayant marqué le développement des systèmes actuels d'automatisation de la conduite. Le chapitre est conclu en soulignant les limitations actuelles de ces systèmes qui partagent la conduite avec le conducteur et met en avant le besoin de bien étudier les interactions dès la phase de conception afin de garantir une bonne coopération et assurer l'aspect sécuritaire que ces systèmes sont censés amener.

1.2 Vers une automatisation élevée de la conduite

1.2.1 Accidentologie et besoin d'assistance

Le nombre d'usagers de la route a connu une expansion considérable au cours des dernières décennies. Face à cela, de nombreux défis se sont imposés concernant la sécurité routière et les problèmes économiques qui en découlent. L'OMS dans son rapport sur la sécurité routière a révélé que les accidents de la route entraînent environ 1,25 million de décès par an [9]. En outre, c'est la première cause de décès chez les jeunes âgés de 15 à 29 ans.

Par ailleurs, en prenant en compte les coûts médicaux et sociétaux (premiers secours, convalescence, etc), les coûts matériels (dommages des véhicules, etc.), les frais généraux (frais d'expertise, de justice, etc.) mais aussi la perte de production future des victimes, une estimation du coût d'un tué sur la route a été donnée par l'Observatoire National

Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR). Celle-ci s'élevait à 1,2 million d'euro approximativement en 2011 [10]. Au total, le coût direct de l'insécurité routière en France a été estimé à 23 Md€ pendant la même année. De ce fait, l'insécurité routière représente un cout qui pèse lourdement sur la collectivité.

Pour toutes ces raisons, la sécurité routière est une priorité en matière de santé publique en Europe [11].

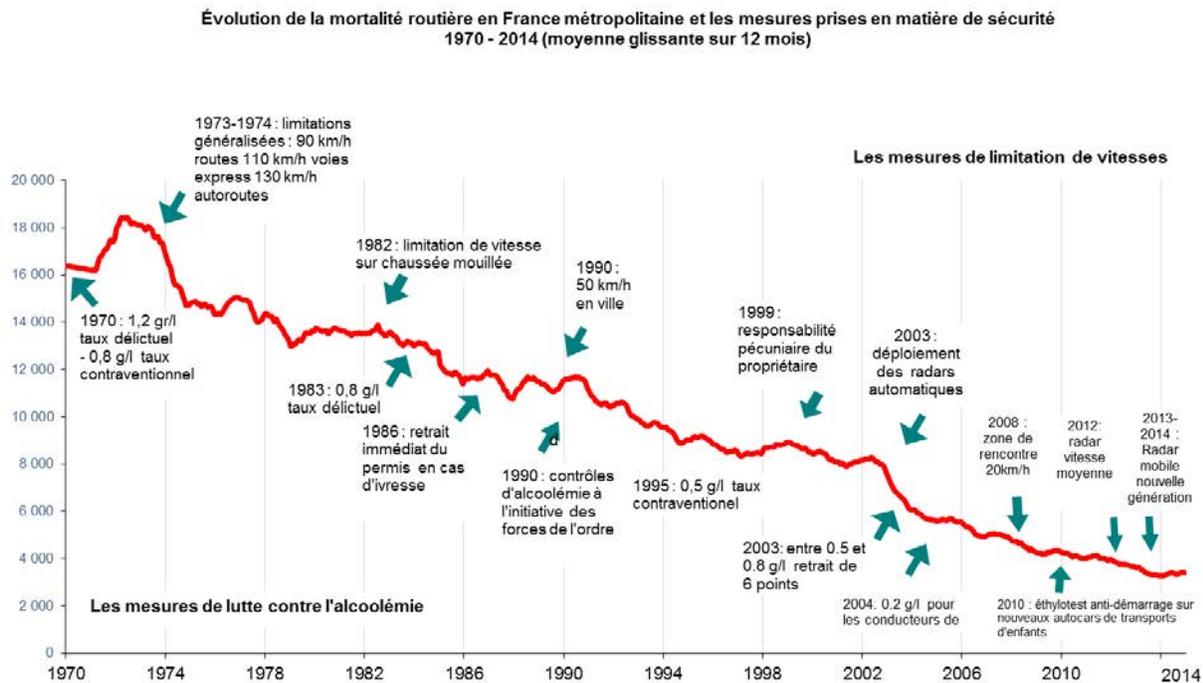


FIGURE 1.1 – Evolution de la mortalité routière en France métropolitaine et mesures prises en matière de sécurité 1970 – 2014 (moyenne glissante).

Les mesures prises au fil des dernières décennies se sont soldées par un taux de mortalité en recul comme l'illustre la Figure 1.1.

1.2.2 Mesures pour l'amélioration de la sécurité routière

Un accident de la route est la résultante de nombreux facteurs. Il est donc nécessaire de l'analyser en fonction de ses composantes pour mieux comprendre comment elles interagissent. Il est d'usage de classer les causes d'accident selon trois catégories générales correspondant aux facteurs :

1. Conducteur

2. Infrastructure

3. Véhicule

En se basant sur les rapports de police, le guide de l'administration fédérale des routes [1] a établi la contribution de chacun de ces facteurs au taux d'accidents enregistrés aux Etats Unis (Figure 1.2).

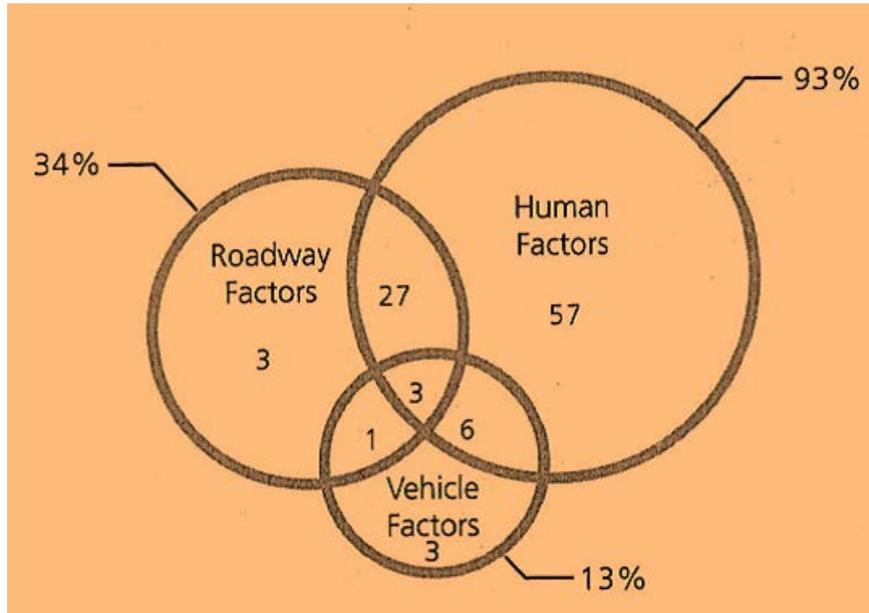


FIGURE 1.2 – Les facteurs contribuant aux accidents de la route [1]

Dans ce qui suit, les mesures pour l'amélioration de la sécurité routière sont exposées pour chaque catégorie (facteurs liés à l'humain, à l'infrastructure et aux véhicules).

1.2.2.1 Les facteurs liés à l'humain

En se concentrant principalement sur le comportement de conduite des usagers de la route, ce volet traite des facteurs comportementaux clés tels que l'inattention, le choix inadéquat de la vitesse, la conduite sous influence, la non-utilisation des ceintures de sécurité et des dispositifs de sécurité pour les enfants, l'utilisation du téléphone portable pendant la conduite ... etc. L'adoption de lois sur la sécurité routière en conjugaison avec le dispositif veillant à les mettre en application et les faire respecter s'avère un mécanisme efficace pour améliorer le comportement des usagers de la route et ainsi la sécurité routière.

La Figure 1.1 (paragraphe 1.2.1) retrace l'évolution du nombre de tués en France avec les différentes mesures adoptées durant les dernières décennies. La figure montre clairement une tendance en baisse mais il est possible que ce ne soit pas uniquement dû à ces mesures mais également aux véhicules qui sont devenus de plus en plus sûrs. Bien sûr, ces mesures n'ont

un impact positif que si elles sont appliquées et mises en œuvre de façon appropriée. Dans le but de les promouvoir, elles sont généralement accompagnées de campagnes de sensibilisation dont l'efficacité repose sur une analyse préalable du contexte qui détermine le ton et le contenu du message ainsi que le public auquel il s'adresse.

1.2.2.2 Les facteurs liés à l'infrastructure

De par sa conception ainsi que l'entretien dont elle bénéficie, la signalisation et les instructions de sécurité, l'infrastructure joue un rôle important dans la sécurité routière. En effet, elle est à elle seule la cause de 3% des accidents de la route. De plus, 34% des accidents sont liés à l'infrastructure combinée à d'autres facteurs [1] (Figure 1.2).

Même le conducteur le mieux formé et le plus conscient peut être à la merci de l'état de la route, sachant que les infrastructures matérielles telles que le revêtement routier, les séparateurs ainsi que l'installation et l'entretien d'équipements d'orientation du trafic routier sont des éléments essentiels dans la réduction des accidents. Il est important que l'environnement routier soit prévisible par les usagers. Par exemple, lors de la conception de virages il faut prévoir une distance de visibilité suffisante pour détecter et s'arrêter à temps en présence d'un obstacle sur la route.

Il est donc important de suivre lors de la conception de l'infrastructure routière un certain nombre de pratiques et de normes habituellement définies par des organismes gouvernementaux tels que la FHWA (Federation of Highway Administration) aux Etats Unis ou encore des établissements publics sous tutelle gouvernementale comme le Cerema en France (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement). Selon le type de risque, une panoplie de contre-mesures peut être employée afin de réduire le taux d'accidents sur les routes (se référer à [1] pour des exemples).

En outre, la signalisation routière est également un outil nécessaire à la sécurité. Elle est utilisée afin de communiquer des informations qui aident à assurer la sécurité des conducteurs durant leurs trajets. Elle doit attirer l'attention, être claire, répondre à un besoin précis, exiger le respect, et donner suffisamment de temps aux conducteurs pour réagir. De la même manière, l'emploi de la signalisation doit respecter un certain nombre de règles afin qu'elle soit efficace.

1.2.2.3 Les facteurs liés aux véhicules

A peine la voiture née qu'il fallait déjà la pourvoir de dispositifs de sécurité. En effet, la voiture d'aujourd'hui regorge de dispositifs et de pièces technologiques essentiels auxquels on ne prête presque plus attention. A l'exemple des rétroviseurs, la ceinture de sécurité et les essuie-glaces sont des dispositifs dont l'utilité paraît évidente, mais qui n'ont pourtant été introduits que progressivement afin de répondre à un besoin de sécurité. Quand on réfère à la

sécurité des véhicules, deux volets peuvent généralement être évoqués. Le terme sécurité active est utilisé pour désigner les technologies qui aident à prévenir l'accident et la sécurité passive désigne les composants du véhicule (principalement les airbags, les ceintures de sécurité et la structure physique du véhicule) qui aident à protéger les passagers lors d'une collision.

1.2.2.3.1 Sécurité passive La voiture d'aujourd'hui est devenue un cocon technologique afin de préserver les occupants en cas d'accident. Au début des années 50, les constructeurs commencèrent déjà à exécuter des crash-tests frontaux, puis des tests de tonneau pour évaluer la sécurité passive des véhicules [12].

En couplant la ceinture de sécurité à l'airbag, les fatalités de passagers ont connues une réduction qui a atteint 55%, de même pour les blessures graves qui ont été réduites jusqu' à 60% [13].

Il était également impératif de renforcer l'habitacle enveloppant le conducteur. La structure de la carrosserie a été considérablement rigidifiée avec les avancées en métallurgie qui ont permis de développer des alliages d'acier de haute résistance [14]. Les zones déformables ont été développées afin d'absorber et de dissiper un maximum l'énergie lors de l'impact en réduisant notamment l'accélération négative sur les passagers. De la même manière, l'usage de verre feuilleté dans le pare-brise avant est choisi afin d'éviter la projection d'éclats à l'intérieur ainsi que l'éjection des passagers lors d'un choc.

La recherche en sécurité passive a fait d'énormes progrès en améliorant la résistance aux chocs et en prenant en compte les usagers vulnérables, grâce notamment aux actions gouvernementales et celles des constructeurs automobiles. Aujourd'hui les facteurs potentiels d'amélioration semblent être épuisés et les constructeurs se tournent vers la sécurité active avec un objectif de réduire les accidents ou d'atténuer leurs conséquences.

1.2.2.3.2 Sécurité active Initialement, la sécurité active était principalement axée autour de l'amélioration de la stabilité du véhicule ainsi que l'amélioration de la perception du conducteur.

Dans le but d'accroître la stabilité du véhicule un intérêt particulier a été porté à la liaison du véhicule au sol. Les pneus étant les principaux acteurs qui interviennent dans ce cas, de nombreux efforts ont été consacrés à l'amélioration de leur comportement et de leur fiabilité. Selon les données de la NHTSA, 78.392 accidents se produisent annuellement aux Etats Unis à cause de défaillances des pneus [15]. Ces défaillances peuvent être liées à la pression des pneus ou à des crevaisons. Hormis des innovations telles que le pneu de "roulage à plat" qui permet de rouler jusqu'à 80 km après une crevaison, et les pneus saisonniers qui permettent une meilleure adhérence en fonction des conditions de la météo, c'est le maintien d'une bonne pression des pneus qui a suscité le plus d'intérêt. A cet effet, le TPMS (Tyre pressure monitoring system) ou système de supervision de la pression des pneus a été introduit. C'est

un système d'assistance qui avertit le conducteur lorsque la pression des pneus est inférieure ou supérieure aux limites prescrites [16].

L'éclairage automobile est un autre aspect de la sécurité active. Dans le but de l'amélioration des conditions visuelles dans l'obscurité, un intérêt particulier a été porté à la technologie d'éclairage utilisée afin de trouver le bon compromis entre consommation d'énergie et qualité d'éclairage. Sur les deux dernières décennies plusieurs progrès ont été faits notamment avec l'introduction des phares à décharge au xénon ou HID (High-intensity discharge), les ampoules à LED et finalement la technologie laser. Ces dernières techniques assurent un meilleur éclairage par rapport à l'éclairage traditionnel à incandescence en permettant par exemple de réduire le temps de détection des piétons [17] ou d'améliorer les temps de détection et de réaction associés au freinage du véhicule [18].

L'éblouissement des phares est une autre problématique pour l'éclairage automobile. Source d'inconfort, il peut être handicapant pour le conducteur dans certains cas. Face à ce problème les projecteurs automatiques [19] ont été proposés. Ce système permet une gestion de l'allumage automatique des feux de route en fonction des conditions d'éclairage et de circulation environnantes pour une conduite de nuit plus confortable. Les projecteurs directionnels sont également une mesure pour renforcer la sécurité en améliorant la visibilité de nuit [20]. Il s'agit d'un système de pilotage automatique des feux de route pour suivre l'angle de braquage du véhicule et permettre de voir plus tôt le profil de la route et ainsi de repérer plus tôt les autres usagers et les obstacles éventuels.

La sécurité active a connu aujourd'hui un bond en avant avec l'avènement de systèmes d'assistance capables d'aider le conducteur activement dans sa tâche de conduite en analysant la situation pour non seulement lui fournir des informations utiles et des alertes pertinentes mais également agir directement sur l'actionnement du véhicule afin d'éviter des situations dangereuses et atténuer les conséquences d'accidents.

1.3 Systèmes avancés d'aide à la conduite

Aujourd'hui plusieurs systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) sont dotés de la capacité d'assister le conducteur de diverses manières pour réduire le stress de la conduite et apporter plus de sécurité. L'apparition de ces nouvelles technologies est principalement due aux progrès réalisés dans plusieurs domaines, notamment : l'électronique, les télécommunications, le traitement du signal et de l'image, l'automatique... La baisse des coûts de l'électronique (capteurs, réseaux de télécommunication, calculateurs) conjointement à la miniaturisation, ont permis d'intégrer dans les véhicules des fonctionnalités de plus en plus avancées.

1.3.1 Évolution des systèmes d'aide à la conduite

1.3.1.1 Première génération des ADAS

La première génération des ADAS se basait sur les capteurs proprioceptifs mesurant les états internes au véhicule comme la vitesse de rotation des roues, l'accélération, la vitesse de lacet, etc. . . Dans cette catégorie on retrouve l'ABS (Anti-lock Braking System), système introduit par Bosch en 1978 qui limite le glissement des roues en les empêchant de se bloquer lorsque le conducteur freine [21]. Cela permet de garder la manœuvrabilité du véhicule afin de corriger la trajectoire. Quelques années plus tard, l'introduction de l'ESC (Electronic Stability Control) a marqué un grand pas en avant pour le développement des ADAS. Le système assure un contrôle en boucle fermée du mouvement latéral du véhicule en utilisant les mesures sur l'angle de braquage, le moment de lacet et la vitesse de lacet [22]. Ainsi, il détecte les éventuels dérapages du véhicule et aide le conducteur à garder le contrôle en appliquant des forces de freinage sur une ou plusieurs roues en exploitant la fonction ABS. Suite à son introduction dans le marché en 1995, l'analyse des données d'accidentologie dans différents pays a démontré l'apport considérable en termes de sécurité routière [23][24][25]. L'ESC a posé les bases de nouveaux systèmes d'assistance tels que le RSC (Roll Stability Control) [26] qui permet d'éviter les situations critiques pouvant amener au renversement du véhicule.

1.3.1.2 Deuxième génération des ADAS

La deuxième génération des ADAS est née avec la démocratisation des capteurs extéroceptifs. Ces derniers acquièrent des informations provenant de l'extérieur du véhicule, à l'exemple des capteurs ultrason, radar, lidar ou vidéo ainsi que les systèmes de navigation par satellite. Ces diverses informations disponibles sur la route, les véhicules de trafic avoisinants et le positionnement sur la voie peuvent être exploitées dans le développement d'ADAS qui contribuent à l'amélioration du confort et de la sécurité de conduite.

L'arrivée des systèmes de navigation portables autour des années 2004 par exemple, a eu un impact sur la sécurité. En aidant le conducteur à s'orienter, ces dispositifs ont le potentiel de réduire sa charge de travail et lui permettent de se concentrer sur la tâche primaire de conduite ce qui réduit le risque d'accidents liés à l'inattention [27].

Les premiers systèmes d'assistance au parking ont investi le marché au milieu des années 90s [28]. A l'époque ils se basaient uniquement sur des capteurs ultrason de proximité pour détecter les obstacles entourant le véhicule. Initialement, ces systèmes s'enclenchaient en marche arrière et émettaient une alerte à l'approche d'un obstacle. Plus tard, une caméra de recul a été introduite afin de faciliter encore plus la tâche de stationnement.



FIGURE 1.3 – Système d’assistance à la vision de nuit Audi A8.

Les systèmes d’assistance à la vision nocturne ont été introduits pour la première fois par Cadillac dans son modèle « DeVille » en 2000 [29]. Le système utilise une caméra infrarouge dont l’image est projetée sur un écran pour permettre aux conducteurs de voir jusqu’à quatre fois plus loin que la portée des phares dans l’obscurité (Figure 1.3).

Les systèmes d’alerte de sortie de voie LDW (Lane Departure Warning) fournissent une aide aux conducteurs pour lutter contre les sorties de voies dues à l’hypovigilance ou un simple moment d’inattention au volant. Ces systèmes se basent sur de la vision artificielle pour détecter en amont les sorties de voie et alerter le conducteur [30][31]. L’efficacité des alertes diffère selon les modalités utilisées : Sonore, visuelle, haptique ou la combinaison des trois. D’une manière générale, les études ont démontré que ces systèmes permettaient de réduire le nombre de sortie involontaires de voie et leur sévérité dans le cas de distraction et d’hypovigilance [32].

Un autre ADAS disponible sur le marché est le système de détection d’angle mort BSD (Blind Spot Detection). Ce système supervise, grâce à un radar à courte portée, la région de l’angle mort et alerte le conducteur de la présence des véhicules non visibles sur les rétroviseurs. De cette manière, le BSD enlève le besoin de tourner la tête afin de vérifier la présence d’un véhicule et par conséquent apporte plus de sécurité et de confort lors de l’exécution de manœuvres de changement de voie ou de dépassement [33].

Une évolution du BSD ne se contente pas de superviser l’angle mort, mais analyse la situation de conduite afin d’aider le conducteur à prendre une décision de changement de voie. Ces systèmes sont connus sous le nom de système d’aide à la décision de changement de voie ou LCDAS (Lane Change Decision Aid System). Les LCDAS, en analysant les données de caméras et autres capteurs embarqués, offrent à travers l’IHM des recommandations aidant le conducteur dans sa décision de changer de voie et fournissent des informations sur la manière de l’exécuter, notamment l’accélération à appliquer pour réussir une manœuvre sûre

et confortable [34][35][36][37][38].

Toutefois, ces systèmes sont au stade de prototype et une première version pour définir les normes sur les exigences en termes de performance et les procédures de validation à suivre est proposée par l'Organisation Internationale de Normalisation [39].

1.3.1.3 ADAS actifs

Le progrès dans les technologies d'actionnement et particulièrement la technique Drive by Wire permettant de supprimer certaines liaisons mécaniques directes et les remplacer par des systèmes mécatroniques pour l'actionnement du véhicule [40] a donné naissance à une génération d'ADAS qui propose une assistance active au conducteur. Ces systèmes agissent directement sur le contrôle du véhicule soit sur le mouvement longitudinal (vitesse, accélération et freinage), soit sur le mouvement latéral au niveau du volant ou sur les deux à la fois.

Le régulateur de vitesse ou CC (Cruise Control) régule la vitesse du véhicule selon une consigne choisie par le conducteur. Il combine un capteur de la vitesse du véhicule avec l'unité de contrôle du moteur (UCM) qui reçoit la mesure effectuée et effectue les corrections du régime du moteur. L'évolution du CC a donné l'ACC (Adaptive Cruise Control). Grâce à l'utilisation du contrôle électronique des freins ainsi que la technologie radar qui est devenue considérablement abordable, une conduite partiellement automatisée a été rendue possible. Le système utilise un radar pour mesurer la distance, la vitesse et l'orientation des véhicules précédents pour adapter la vitesse en agissant sur les freins et ajuster l'inter-distance selon les préférences du conducteur. Le système maintient la vitesse prédéfinie en l'absence de véhicules comme le régulateur de vitesse traditionnel. L'ACC est considéré comme une fonction de confort [41] car les accélérations appliquées sont limitées, mais il a été montré dans [42] qu'un tel système permet d'augmenter le flux de véhicules sur autoroute. Afin de compléter l'ACC et assurer la sécurité du véhicule, la fonction de freinage d'urgence a été développée.

Selon leur type, les systèmes de freinage d'urgence peuvent soit amplifier l'action de freinage du conducteur lors d'un freinage d'urgence, soit appliquer une force de freinage jusqu'à l'arrêt du véhicule lorsqu'une situation de collision frontale imminente est détectée [43].

Les systèmes qui agissent sur la dynamique latérale du véhicule existent également sous différentes formes et avec des fonctionnalités variées [44]. L'aide au maintien de voie LKA (Lane Keeping Assist) étend la fonction du LDW en appliquant un couple sur le volant pour remettre la voiture sur la voie lorsqu'une sortie involontaire est détectée [45]. Les systèmes de maintien de voie LKS (Lane Keeping System) vont plus loin avec l'objectif d'automatiser le contrôle du véhicule l'automate devenant seul responsable du guidage du véhicule dans sa voie. La combinaison des fonctionnalités du LKS et de l'ACC ont permis le développement

des premiers systèmes de conduite automatisée à basse vitesse notamment en situation de bouchon sur autoroute. On donne l'exemple du « Traffic Jam Assist » de BMW qui maintient le véhicule sur la voie en gardant une inter-distance avec les véhicules précédents pour des vitesses allant jusqu'à 60 km/h [46].

Parmi cette génération d'ADAS hautement automatisés figurent également les systèmes de parking automatisé. Ces systèmes permettent au véhicule de réaliser la manœuvre de parking en mode semi-automatisé en prenant en charge le contrôle latéral ou même de manière entièrement automatique en assurant le contrôle longitudinal également. Ils font appel aux différentes techniques de télémétrie précédemment mentionnées ainsi qu'à la vision artificielle, et ce pour planifier la manœuvre et l'exécuter à l'étage de contrôle [47][48].

La figure 1.4 illustre une feuille de route qui retrace l'évolution des différents systèmes d'assistance à la conduite ainsi que des prévisions sur les tendances à venir. Aujourd'hui nous constatons les développements considérables des ADAS et particulièrement ceux offrant une assistance active dont les fonctionnalités sont de plus en plus complémentaires.

1.3.2 Niveaux d'automatisation de la conduite

Il est naturel de penser que l'ensemble des efforts de recherche et développement capitalisés jusque à ce jour mènera à terme vers des systèmes de conduite entièrement autonome. Entre temps, la définition de niveaux d'automatisation intermédiaires s'est imposée afin de répondre à un besoin d'harmoniser l'ensemble des développements, et ainsi fournir un cadre pour les spécifications et les exigences techniques des systèmes d'automatisation.

A cet effet, différentes institutions, à l'exemple de la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) aux états unis ou encore l'OICA (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles), ont contribué à la mise en place d'échelles de niveaux d'automatisation qui mettent en évidence les étapes à court et moyen terme pour atteindre la conduite autonome [49][3][50][51].

En plus de définir clairement le rôle du conducteur humain pendant l'engagement du système, ces efforts ont permis de fournir les définitions et un lexique commun qui facilite la communication autour de ce thème entre les différents secteurs impliqués, spécialement lorsqu'il s'agit d'élaborer des lois, des politiques, des règlements et des normes.

1.3. Systèmes avancés d'aide à la conduite

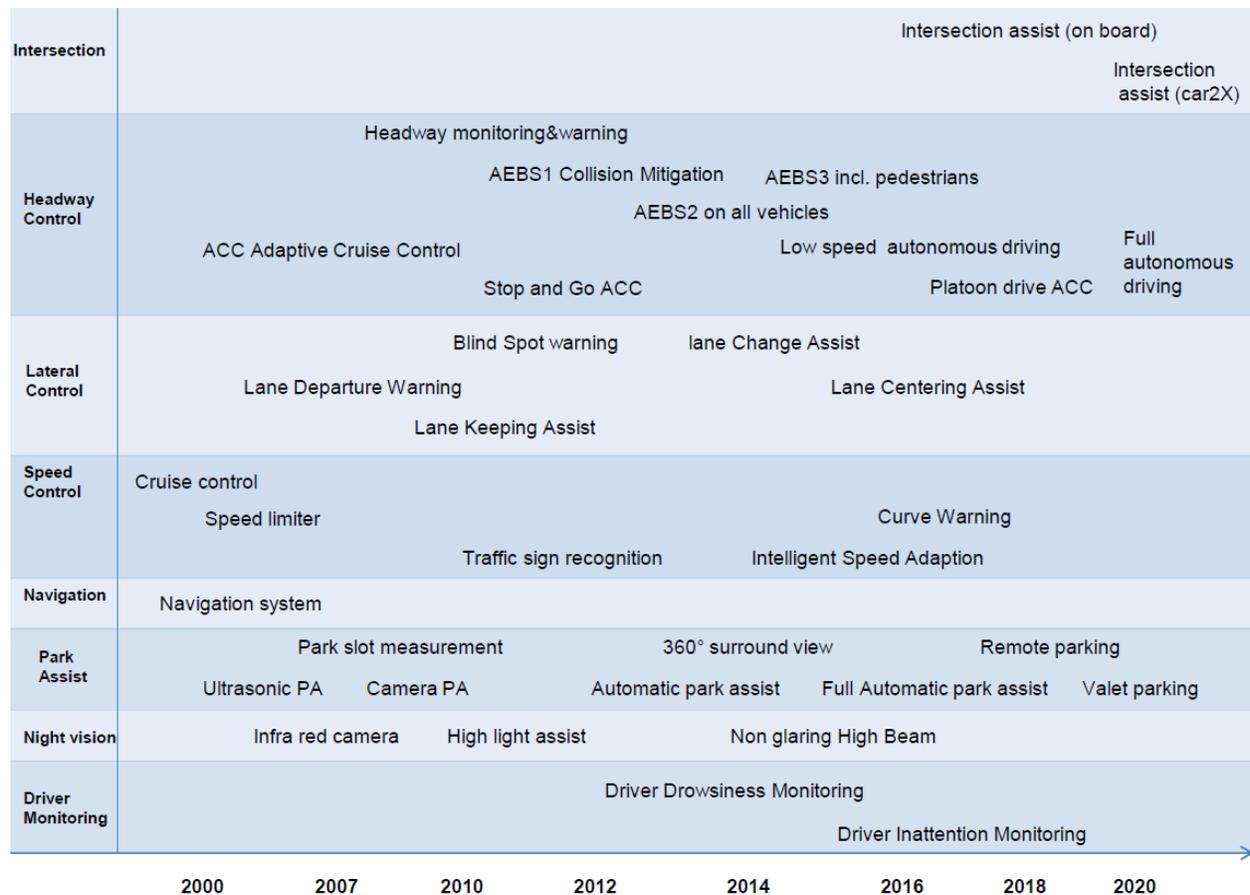


FIGURE 1.4 – ADAS Roadmap (source : [2])

La plupart des échelles s'accordent sur cinq niveaux d'automatisation [3][51].

Les niveaux tels qu'illustrés sur la Figure 1.5 sont décrits dans ce qui suit :

— **Le niveau 0** (conducteur seul)

Le conducteur a en permanence le contrôle complet du véhicule et le système se limite à informer ou alerter le conducteur (LDW, BSD...).

— **Le niveau 1** (conducteur assisté)

Le système assure le contrôle longitudinal ou latéral du véhicule et le conducteur est tenu d'exécuter la tâche restante tout en supervisant en permanence les actions du système qui ignore ses propres limites de fonctionnement. Le « LKA » et « l'ACC » rentrent dans cette catégorie.

— **Le niveau 2** (Automatisation partielle)

Dans ce niveau le système prend le contrôle longitudinal et latéral du véhicule et le conducteur assure un rôle de superviseur. Il n'est pas autorisé à s'engager dans une tâche secondaire car la conduite peut à tout moment nécessiter la reprise en main par

le conducteur.

— **Le niveau 3** (Automatisation conditionnelle)

Similaire au niveau 2, le système assure le contrôle complet du véhicule dans certains cas d’usage bien définis. En revanche, le conducteur pourra se désengager momentanément de la tâche de conduite en l’absence de requête de reprise en main de la part du système qui l’avertit avec un temps suffisant avant les éventuels désengagements.

— **Le niveau 4** (Automatisation élevée)

Les systèmes rentrant dans le niveau 4 sont ceux dotés de la capacité à gérer d’une manière autonome toutes les situations possibles dans un cas d’usage donné. Ainsi, le conducteur peut lui déléguer entièrement la tâche de conduite et s’engager dans une tâche secondaire tout au long du cas d’usage.

— **Le niveau 5** (Automatisation complète)

Le niveau 5 décrit des systèmes entièrement autonomes qui n’ont plus besoin de l’intervention du conducteur pour mener à bien la tâche de conduite sur tout le trajet initialement défini par ce dernier.

L’idée de concevoir des véhicules automatiques n’est pas nouvelle. Malgré les progrès considérables accomplis à ce jour, la quête du véhicule autonome qui transporte les passagers en toute sécurité s’est montrée ardue et nécessitant des efforts collectifs de longue haleine. Dans ce qui suit nous aborderons les points clés qui ont marqué le développement des systèmes actuels et qui nous ont rapprochés encore plus du but.

	Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
	Driver only	Assisted	Partial Automation	Conditional Automation	High Automation	Full Automation
<i>Vehicle guidance</i>	System cannot assume neither longitudinal nor lateral control; control remains with the driver.	System assumes either longitudinal or lateral control	System accomplishes both longitudinal and lateral control			
<i>Monitoring task</i>	Not applicable	Driver must monitor the system at all times. Activities not related to driving are not permitted.	Driver does not have to monitor the system at all times. Activities not related to driving are possible to a limited degree	Driver is not required to monitor the system. Driver may perform activities not related to driving at all times.	No driver required.	
<i>Performance limits</i>	Not applicable	System is not capable of recognizing all of its performance limits. This lies in the responsibility of the driver.	Whenever the system recognizes its performance limits, driver will be requested to resume control.	System recognizes its performance limits. Emergency situations can be accomplished by the system, provided that they can be managed similarly by a human driver during defined use case		... during the whole journey
			System is not capable of transferring to the minimum risk condition out of each situation. Therefore it requests the driver to resume vehicle control with sufficient time margin.	System can cope with all situations automatically. ... during defined use case At the end of the use case the driver is requested to resume vehicle control.		... during the whole journey

FIGURE 1.5 – Niveaux d’automatisation définis par l’OICA (Source : [3]).

1.4 Projets sur l'automatisation de la conduite

1.4.1 Pourquoi « automatisé » au lieu de « autonome » ?

Le terme « véhicule autonome » est souvent utilisé pour décrire les véhicules dotés de la capacité de percevoir et d'évoluer dans leur environnement sans l'intervention de l'humain. Or, il est plus juste d'utiliser le terme « véhicule automatisé » car il décrit un système dont l'autonomie est limitée à des situations bien spécifiques et qui peut être sujet à des défaillances. Il est donc plus adéquat pour décrire les systèmes actuels à l'inverse du terme « véhicule autonome » qui peut être trompeur et suggérer non seulement une capacité du véhicule de gérer la conduite dans divers environnements hautement incertains pendant de longues périodes mais également de se rétablir sans intervention externe en cas de défaillance [52].

1.4.2 Les premières initiatives pour l'automatisation de la conduite

L'automatisation des véhicules a été un sujet d'engouement depuis presque un siècle comme en témoignent certaines œuvres littéraires de science-fiction qui en font mention à l'exemple de la nouvelle « Sally » d'Isaac Asimov publiée en 1953.

Cette technologie est passée du fantasme à la réalité dans les années 80 avec l'apparition de certains prototypes de véhicules pilotés par ordinateur issus de la recherche en robotique notamment dans le projet « Autonomous Land Vehicle » (ALV) [53] au sein de l'Université de Carnegie Mellon (CMU) l'une des pionnières dans le domaine. C'est à CMU également qu'a vu le jour la famille des NAVLAB, une série de véhicules robotisés capables de conduire de manière automatisée grâce à la vision par ordinateur et des techniques d'intelligence artificielle depuis 1986 [54] (Figure 1.6).

Durant cette même période, les premières actions de recherche d'envergure en vue d'améliorer la circulation routière à long terme aussi bien pour ce qui concerne le véhicule que l'infrastructure ont émergé sur différents continents (Etats Unis, Europe et Asie). Ces programmes de recherche multidisciplinaires réunissaient des acteurs dans différents secteurs notamment les organismes gouvernementaux, les constructeurs et équipementiers automobile ainsi que les instituts de recherche. Ceci coïncidait avec le besoin de se projeter en avant de quelques décennies pour savoir répondre à un besoin de transport et de mobilité en constante expansion à l'image d'une économie et d'une population en pleine croissance.

En reconnaissant le potentiel que les technologies d'information et d'assistance offraient pour aider à relever les défis qui se posaient, les programmes de recherche aux Etats Unis, en Europe et en Asie étaient axés autour d'objectifs très similaires : le développement de concepts

et de solutions aptes à rendre le transport routier plus sûr, plus efficace, plus économique et moins polluant.



FIGURE 1.6 – La famille des Navlab 1-10.

En Europe, le programme PROMETHEUS (PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety) [55] lancé en 1987, réunissait 13 constructeurs automobile et un grand nombre d'institutions de recherche à travers 11 pays européens. Avec un budget de 750 millions d'euros sur une période s'étalant entre 1987 et 1995, le programme a contribué énormément au développement de capteurs et de logiciels dédiés aux aides à la conduite comme les régulateurs de vitesse dynamiques, les aides à la navigation et même le développement de véhicules hautement automatisés. Les développements ont fait l'objet d'une démonstration avec la VaMP [56] et sa jumelle VITA-2 [57]. Ces deux véhicules prototypes basés sur la technologie de la vision dynamique par ordinateur alors novatrice, ont démontré la faisabilité de la conduite hautement automatisée sur route réelle en couvrant plus de 1600 km dans un aller-retour entre Munich (Allemagne) et Odense (Danemark) [58].

Au début des années 2000s, l'agence américaine des Projets de Défense Avancés DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) visant à stimuler l'innovation dans la conduite autonome des véhicules terrestres a organisé un nombre de défis encourageant la participation d'équipes de recherche à travers le monde pour remporter des prix qui se sont élevés jusqu'à 2 millions de dollars.

Les deux éditions du DARPA Grand Challenge en 2004 puis 2005 se sont tenues sur un parcours de 240 kilomètres dans le désert de Mojave. Ils avaient pour but le développement de véhicules autonomes capables de parcourir des environnements semi-structurés dans des conditions assez rudes. Ce défi a été remporté par Stanley (Figure 1.7), un Volkswagen

Touareg R5 TDI, développé par une équipe de recherche de l'Université de Stanford en collaboration avec des experts de Volkswagen, Mohr Davidow Ventures et Intel Research [59].

Le DARPA Urban Challenge en 2007, remporté par l'équipe de l'Université Carnegie Mellon avec son véhicule Boss [60] (Figure 1.7), a lui été un tournant dans la démonstration du potentiel des véhicules autonomes dans des environnements urbains. Il fallait gérer dans diverses situations urbaines avec cette fois la nécessité de conduire avec du trafic, ce qui a rajouté une difficulté supplémentaire relativement aux premiers défis.



FIGURE 1.7 – Stanley (figure à droite). Boss (figure à gauche)

A travers les compétitions qu'elle a organisées, la DARPA a montré au monde les progrès impressionnants réalisés en matière de conduite automatisée et a encore une fois éveillé l'intérêt pour cette technologie prometteuse [61].

Depuis les années 2000 de nombreux projets florissent à travers le monde en essayant de répondre à l'ensemble des problématiques qui se posent face au déploiement à large échelle des véhicules autonomes. Dans ce qui suit nous présentons les projets sur l'automatisation de la conduite en Europe.

1.4.3 Les projets sur l'automatisation de la conduite en Europe

Avec la multiplication de systèmes d'aide et d'information au sein de l'habitacle, la problématique de l'interaction avec le conducteur s'est imposée. Le projet européen HASTE (2002 - 2005) a eu pour objectif d'étudier l'influence de ces systèmes sur le conducteur afin de fournir des lignes directrices à suivre lors de la conception des interfaces homme-machine et des méthodologies permettant leur évaluation avant le déploiement sur véhicule [62].

AIDE (2004 - 2008) a repris sur une problématique similaire. Le projet européen qui a rassemblé 28 partenaires des principaux secteurs clés, à savoir des équipementiers, des constructeurs

automobiles et des organismes de recherche, s'est fixé l'objectif d'étudier les problématiques liées à l'interface homme-machine des systèmes intelligents de sécurité routière. L'objectif était de développer une IHM qui adapte l'information en prenant en compte le triplet : Conducteur-Véhicule-Environnement. A cet effet, les différentes modalités, visuelle, auditive et haptique ont été étudiées dans le but de concevoir des IHMs garantissant l'efficacité des systèmes d'aide à la conduite pour maximiser l'apport en termes de sécurité [63].

Le projet ARCOS en France, s'inscrivant dans la lignée des actions fédératives PREDIT s'est déroulé entre 2001 et 2004. 60 partenaires issus des secteurs de la recherche et de l'industrie se sont intéressés à la sécurisation de la conduite automobile sur la base des fonctions de prévention d'accidents suivantes : L'alerte, la gestion des inter-distances et la prévention des collisions et des sorties de voie. En plus de traiter des aspects techniques comme la perception, le caractère novateur d'ARCOS était d'adresser des questions d'ergonomie et de coopération avec le conducteur. Ainsi des fonctionnalités d'aide à la conduite ont été largement étudiées et développées notamment des systèmes d'alertes de sortie de voie et le régulateur de vitesse adaptatif ACC. Toutefois, peu de travail a été consacré aux fonctionnalités de contrôle latéral des véhicules.

Ces mêmes problématiques ont été au cœur du projet européen PReVENT-IP (Preventive and Active Safety Applications Integrated Project 2004-2008) qui a impliqué quelques 50 partenaires des secteurs public et privé [64]. Le but était de développer des dispositifs préventifs de sécurité pour aider à éviter les accidents ou à en atténuer les effets grâce à l'utilisation de systèmes intelligents qui tiennent compte de la nature du danger et de l'état du conducteur. Le système d'aide développé proposait de moduler le niveau d'intervention en fonction de la criticité de la situation. En effet, celui-ci devait : informer le conducteur le plus tôt possible, l'avertir en cas d'absence de réaction à l'information, l'assister activement ou finalement intervenir afin d'éviter un accident ou en atténuer les conséquences. Le projet a abordé différentes fonctions d'aide à la conduite permettant au conducteur de maintenir une vitesse sûre ainsi qu'une distance de sécurité, maintenir le véhicule dans la voie, éviter les dépassements dangereux, traverser les intersections en toute sécurité, éviter les accidents avec les usagers de la route vulnérables et réduire la gravité d'un accident inévitable.

Sur la lignée de son prédécesseur, INTerACTIVE a bénéficié du financement européen entre 2011 et 2013 pour explorer le développement d'ADAS d'alerte et d'intervention [65]. Les principales réalisations ont été la création et l'évaluation de systèmes ADAS intégrés, dotés de grandes capacités pour assister le conducteur dans des scénarios de trafic variés : en autoroute, en route de campagne et dans les intersections. Les développements ont été implémentés dans plusieurs démonstrateurs qui ont fait l'objet d'une validation étendue avec des essais réels et des expérimentations sur simulateur. Une attention particulière a été accordée aux solutions

peu coûteuses pour viser tous les segments de véhicules. Un deuxième axe de recherche du projet a été l'étude de l'interaction entre le conducteur et le véhicule. L'objectif était d'assurer la cohérence entre les actions du conducteur et du système en tenant compte des informations, des avertissements et des interventions de manière holistique. Le projet a souligné le besoin d'améliorer d'avantage la perception et les algorithmes de fusion de données pour atteindre plus de fiabilité en temps réel dans des environnements urbains complexes.

Les projets sus-mentionnés se situent en bas de l'échelle d'automatisation notamment les niveaux 0 et 1. Par ailleurs, d'autres projets se sont focalisés sur des niveaux (d'automatisation) plus élevés à l'exemple de Citymobil et Citymobil2. Ces deux projets européens ont visé le niveau 5 avec l'ambition de concevoir des systèmes de transport routier entièrement autonomes ou ARTS (Automated Road Transport System). Toutefois, cette application a des spécificité particulières notamment la circulation à très basse vitesse dans des environnements contrôlés ce qui la rend différente de la conduite classique. Il existe des prototypes de véhicules hautement automatisés (Niveau 5) à l'exemple de la "Google Car" qui ne requièrent pas de conducteur à bord (figure 1.8). Néanmoins, les capacités démontrées lors des démonstrations sont limitées à des environnements contrôlés où les conditions de météo sont optimales. D'après les prévisions du directeur de projet, la "Google Car" ne sera pas prête au déploiement sur route réelle avant une trentaine d'années [66].



FIGURE 1.8 – Le prototype de Google de la voiture autonome

Compte tenu des limites actuelles de la technologie, la plupart des projets récents abordent les niveaux 2 et 3 d'automatisation. Le projet européen HAVEit [67][68] avec ses 17 partenaires à travers l'Europe s'était fixé trois principaux objectifs :

1. Le développement et la validation d'une nouvelle génération d'ADAS avec un haut niveau d'automatisation.

2. Le développement et la validation d'une architecture adaptée au véhicule hautement automatisé qui inclut la redondance et supporte la tolérance aux fautes.
3. Garantir une bonne interaction ainsi qu'une répartition des tâches bien étudiée dans le cadre d'un système Conducteur/ Automate.

Le projet avec ses moyens de taille a mis l'accent sur certaines notions importantes telles que le fonctionnement en collaboration entre le système et le conducteur. Le système a été conçu avec l'idée d'une complémentarité entre le conducteur et l'automate. Pour cela, une attention particulière est consacrée à la répartition des tâches entre les deux agents et ainsi trois niveaux d'assistance ont été définis : (1) Un mode assisté où le conducteur détient le contrôle du véhicule mais il bénéficie d'informations et d'alertes utiles ; (2) Un mode semi-automatisé qui intègre les fonctionnalités d'un ACC et (3) Un mode hautement automatisé qui permet au conducteur de déléguer le contrôle du véhicule au système sous certaines conditions. Par conséquent, une forme de coopération discrète a été mise en place pour permettre des transitions graduelles entre ces modes de fonctionnements selon la situation contrairement aux approches classiques qui se limitaient à des transferts abrupts d'autorité entre le système et le conducteur. Le projet HAVEit a été donc un précurseur sur la thématique de la coopération Homme-Machine dans la conduite hautement automatisée. Il a amorcé une méthodologie qui a inspiré les projets qui ont suivi.

Entre 2009 et 2012, PARTAGE un projet ANR français [69] s'est concentré sur la prévention des sorties involontaires de voie. Avec une approche de nature pluridisciplinaire ralliant automaticiens, psychologues, ergonomes et statisticiens, le projet a étudié la coopération entre le conducteur et un système de maintien de voie dans une perspective de contrôle partagé. Cette dernière consiste à répartir l'effort total à fournir pour garder le véhicule dans la voie entre le conducteur et le système. PARTAGE a notamment montré la faisabilité du contrôle partagé en utilisant une modélisation cybernétique du conducteur [70] et a su démontrer son intérêt dans de multiples études sur simulateur de conduite [71]. Pendant cette même période le projet ANR-ABV a pris l'initiative de concevoir un système d'automatisation des véhicules à faible vitesse (moins de 50 km/h) sur un itinéraire sécurisé. Le projet a abordé de nombreuses thématiques qui sont au cœur de la conduite hautement automatisée : perception, planification de trajectoire et contrôle. De plus, la thématique d'interaction et de coopération homme-machine a constitué un axe de recherche à part entière [72]. Les travaux ont mené à la conception de lois de commande permettant le contrôle partagé entre le conducteur et l'automate. L'idée du contrôle partagé dans ABV différait de celle dans PARTAGE. L'objectif était de permettre à l'assistance de moduler son intervention sur la direction en fonction de l'autorité accordée au conducteur afin de pouvoir l'assister en continu et de gérer des situations de conflit le cas échéant [73].

En Allemagne, le projet PRORETA 3 avait pour but de repenser les systèmes d'assistance de manière holistique afin d'assurer un développement cohérent du système d'automatisation global. De plus, ce projet a porté un œil nouveau sur la conduite automatisée et a proposé un concept coopératif intéressant qui permettait le guidage du véhicule uniquement à travers les manœuvres communiquées par le conducteur au niveau de l'IHM [74].

Dans ce même contexte, le projet ANR-CoCoVeA (2013 - 2017) propose une intégration centrée sur l'homme de différents types de systèmes en tenant compte de la complexité croissante du domaine automobile. L'objectif majeur du projet est la réduction des risques d'interactions néfastes entre les différents systèmes embarqués et le conducteur afin de garantir la sécurité et plus largement la qualité d'utilisation du système pour une meilleure acceptabilité. A cet effet, il y a été entrepris de concevoir le système d'assistance en intégrant les contraintes liées à la coopération avec le conducteur dès les phases amont. Cette vision repose fortement sur la notion de partage du contrôle du véhicule entre conducteur et automate, technique dont les bases ont été posées dans le cadre des projets ANR-ABV et ANR-PARTAGE. Deux points essentiels sont traités :

1. Le contrôle du niveau d'automatisation de la conduite - et notamment du partage de la tâche de guidage - ainsi que la gestion de l'autorité entre conducteur et automates afin de maintenir en permanence le niveau de vigilance et de conscience de la situation du conducteur à un niveau acceptable,
2. La coordination, le filtrage et la priorisation des échanges d'informations entre les différents systèmes d'aide et le conducteur de manière à ne pas engendrer de surcharge informationnelle, la capacité de communication du conducteur dépendant de la situation à gérer et du niveau d'automatisation engagé.

La gestion des interactions entre le système et le conducteur est un point important qui revient souvent dans les projets traitant de l'automatisation partielle (Niveaux 2 et 3). En effet, c'est un point crucial qui permet d'éviter les problèmes liés à l'automatisation. Ces derniers sont détaillés dans la section qui suit.

1.5 Les problèmes liés à l'automatisation

Les niveaux d'automatisation abordés actuellement se limitent à une automatisation partielle où le conducteur délègue le contrôle du véhicule tout en restant responsable de la tâche de conduite [49]. En effet, l'humain se voit ajouter à la tâche de contrôle et de supervision de la conduite celle de superviser des agents artificiels qui agissent en parallèle sur le véhicule. D'ailleurs, enlever l'opérateur humain de la boucle de contrôle ne suffit pas pour supprimer l'erreur humaine [75]. En effet, la littérature abonde d'études mettant en évidence les problématiques de facteurs humains en la présence d'une automatisation mal conçue et qui peuvent

être critiques pour la sécurité de l'opérateur [76][77].

Il a été constaté qu'à des niveaux d'automatisation élevés, la perte de la conscience de la situation peut être problématique [78]. Par exemple, il peut se produire que l'opérateur humain ne reçoive pas des informations à temps. De plus, l'automatisation peut altérer la compréhension du procédé contrôlé ou entraîner une détection tardive d'un événement critique.

Une autre difficulté récurrente est le développement d'une « sur-dépendance » au système en plus du phénomène de complaisance [79]. À titre d'exemple, les systèmes d'aide à la décision pourraient amener les opérateurs humains à devenir passifs et complaisants en ce qui concerne les suggestions du système, en particulier, lorsqu'ils ne comprennent pas les motivations derrière. Il a été démontré que les opérateurs humains pouvaient accepter des solutions moins bonnes que ce qu'ils auraient trouvé sans une quelconque aide [80].

La confiance dans l'automatisation peut également influencer la performance globale [81] [82]. Elle peut entraîner l'abandon (inutilisation) ou l'abus (mauvais usage) de l'automatisation comme rapporté dans [83]. Un autre problème pouvant être imputé à l'automatisation serait la perte de compétences [84].

Ainsi, les efforts dans le domaine de la coopération homme-machine visent à définir des lignes directrices pour concevoir une interaction et une coopération efficaces entre l'humain et l'automatisation dans le but de remédier aux problèmes susmentionnés [85] [86] [87].

Après presque deux décennies de recherche et développement, les résultats sont plus que concluants. Nul n'a de doute aujourd'hui de voir les véhicules autonomes s'inscrire dans notre quotidien dans le futur. Toutefois, il faut se rendre à l'évidence que les systèmes d'automatisation partielle disponibles actuellement ont encore du chemin à faire et sont loin d'être parfaits. Tesla à titre d'exemple a déjà commercialisé son « Autopilot » dans sa gamme de luxe pour assister le conducteur dans la conduite sur autoroute. L'expérience a déjà montré un certain nombre de défaillances (en zones de travaux par exemple et dans la négociation de certains virages) où les conducteurs ont du intervenir en urgence afin de corriger les actions erronées du système [88]. Les abus d'un tel système et la sur-confiance que pourraient accorder certains conducteurs à des systèmes similaires à l' « Autopilote » de Tesla sont problématiques. Les Etats Unis ont déjà déploré une fatalité en mai 2016 lorsqu'un conducteur inattentif conduisait avec le système engagé alors que ce dernier avait atteint sa limite [89]. Ceci démontre le danger que peuvent représenter ces systèmes lorsque l'impression de sécurité qu'ils peuvent donner ne reflète pas leurs réelles capacités. Ce drame souligne le besoin de concevoir des systèmes capables de coopérer avec le conducteur en garantissant à tout instant non seulement la compréhension des actions du système et ses limites, mais également la possibilité de partager la conduite afin de maintenir le conducteur dans la boucle.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a décrit les étapes d'évolution des systèmes avancés d'aide à la conduite qui ont pavé le chemin vers les systèmes d'automatisation de la conduite qu'on connaît aujourd'hui. Hormis les avancées spectaculaires réalisées à ce jour, les limitations de ces systèmes et le rôle que détient toujours le conducteur dans la tâche de conduite nous impose de procéder avec beaucoup de précaution lors de la phase de conception pour ne pas compromettre l'aspect sécuritaire qu'ils entendaient apporter initialement. L'expérience a déjà montré que des abus avec ce genre de systèmes pouvaient avoir des conséquences dramatiques et que la coopération avec le conducteur était la clé pour garantir notamment leur efficacité et leur acceptabilité.

Chapitre 2

Architecture pour la coopération Homme-Machine multi-niveau

2.1 Introduction

Une fois le besoin de coopérer entre le conducteur et le véhicule automatisé mis en évidence, il est important de proposer un cadre qui structure cette coopération. Ce chapitre présente la réflexion menée afin d'aboutir à une architecture fonctionnelle destinée à supporter la coopération entre le conducteur et le système. Pour cela, nous commençons par rappeler les problèmes liés à l'automatisation. Par la suite, les principes de la coopération homme-machine sont exposés dans un cadre général avant d'être détaillés pour le cas de la conduite automobile. En réunissant des éléments issus de la modélisation de la conduite et les principes de la coopération Homme-Machine, l'architecture d'un système coopérant d'automatisation de la conduite est construite. Elle repose sur la notion de coopération Multi-niveau que nous pensons essentielle pour assurer une coopération riche et complète avec l'utilisateur du système.

2.2 La coopération Homme-Machine

L'association de l'homme et de la machine pour accomplir diverses tâches et contrôler des procédés a donné naissance à la notion de *Système Homme-Machine*. Cet ensemble est caractérisé par des interactions et des processus cognitifs qui peuvent être complexes [90]. Un système Homme-Machine est décrit comme étant « une synthèse fonctionnelle entre un homme et un système technologique » dans [91].

Il est important de savoir que lorsqu'on automatise, la machine ne se substitue pas simplement à l'activité humaine. Dans la plus part des cas, l'automatisation ne remplace pas l'opérateur mais modifie profondément son activité, et cela souvent d'une manière imprévue

et inattendue par le concepteur [83]. Par conséquent, l'automatisation ne peut se résumer à "enlever des tâches à l'humain au profit de la machine". Il convient également de s'assurer que l'opérateur puisse encore maîtriser le procédé et les situations auxquelles il devra faire face [92].

Une première étape vers la conception de la coopération entre l'humain et l'automatisation réside dans la définition de l'organisation structurelle. Cette dernière spécifie les responsabilités des agents dans le but de résoudre les conflits décisionnels [93]. A cet effet, deux structures de coopération sont habituellement identifiées. D'une part, la structure verticale (hiérarchique) qui met un agent sur un niveau hiérarchique supérieur tout en lui donnant la possibilité d'interagir et d'échanger des informations avec les autres agents, il conserve l'autorité finale sur la décision. D'autre part la structure horizontale ou hétérarchique qui met les agents sur le même niveau hiérarchique. Ils évoluent donc d'une manière indépendante tant que leurs tâches sont dissociées mais ils doivent gérer les situations conflictuelles lorsqu'elles apparaissent.

Hormis la structure, une question fondamentale s'impose lors de la phase de conception du système : *"Compte tenu des capacités techniques du système, quelles fonctions doivent être automatisées et dans quelle mesure ?"* [4]. La réponse à cette question se fait par l'allocation des tâches qui est une étape cruciale. Elle permet la répartition des fonctions entre l'humain et la machine ainsi que la définition de leurs responsabilités respectives [94]. Plusieurs façons d'aborder ce problème peuvent être adoptées [4] :

Pour la première, compte tenu des avantages de l'automatisation dans l'amélioration de l'efficacité, l'approche économique prescrit d'automatiser toute tâche techniquement possible et qui permet une réduction des coûts. L'humain se voit alors confier des fonctions que le concepteur trouve difficiles, coûteuses ou impossibles à automatiser. Un inconvénient majeur de cette méthode vient du fait que l'optimisation d'un ensemble de sous-tâches à travers l'automatisation n'entraîne pas nécessairement l'optimisation de l'ensemble du système Homme-Machine [83].

Par conséquent, la seconde approche recommande qu'au lieu de s'intéresser uniquement aux avantages économiques qu'apporte l'automatisation, une alternative serait de choisir les tâches à automatiser en tenant compte des capacités de l'homme et de la machine. L'analyse des tâches s'avère être un outil important pendant la phase d'allocation des tâches. Elle repose généralement sur deux critères : la faisabilité technique et la faisabilité ergonomique [90][95].

Le premier critère permet de diviser l'ensemble de tâches initiales en deux classes : les tâches techniquement réalisables par la machine et les tâches qui ne peuvent l'être en raison d'un manque d'information ou pour des raisons techniques ou théoriques et qui par conséquent

doivent être attribuées aux opérateurs humains.

Le deuxième critère, celui de la faisabilité ergonomique, est appliqué pour évaluer les tâches humaines en termes de sécurité globale du système.

En effet, parmi les tâches techniquement automatisables, certaines peuvent également être effectuées par l'humain et leur attribution à des opérateurs humains pourrait permettre à ces derniers de mieux superviser et comprendre le système global ainsi que les dispositifs automatisés. Cette catégorie représente des tâches pouvant être partagées entre les deux agents (automate et humain). Par ailleurs, parmi les tâches réalisables uniquement par l'humain, certaines sont caractérisées par une complexité élevée et parfois imposent un temps de réponse très court. Des systèmes d'aide à la décision ou d'aide au contrôle peuvent être utiles dans ce cas. Ceci constitue la base d'une autre forme de coopération homme-machine dans laquelle les agents ont des capacités complémentaires et les tâches sont partagées en conséquence. Ce critère (de faisabilité ergonomique) se base sur des modèles d'opérateurs humains qui définissent les ressources humaines potentielles, ainsi que les limites intrinsèques des opérateurs (perceptuelles et / ou physiques) lors de l'exécution des tâches. Les ressources cognitives humaines dépendent du contexte, et les ressources physiques humaines peuvent être déterminées selon des directives ergonomiques.

En réalité, l'attribution des tâches ne se résume pas à une simple répartition des tâches entre l'humain et la machine car certaines tâches doivent être partagées et exécutées conjointement. De plus, le rôle humain et le degré de sa participation ont un impact sur le système humain-machine global [96] [95]. L'importance de ces influences sur la performance globale du système homme-machine, au regard de la productivité et de la sécurité, a été étudiée depuis le début des années 1980. Cela a conduit à l'introduction d'échelles définissant différents niveaux d'automatisation comme celle représentée sur le tableau 2.1 [97].

High	10. The computer decides everything, acts autonomously, ignoring the human. 9. informs the human only if it, the computer, decides to 8. informs the human only if asked, or 7. executes automatically, then necessarily informs the human, and 6. allows the human a restricted time to veto before automatic execution, or 5. executes that suggestion if the human approves, or 4. suggests one alternative 3. narrows the selection down to a few, or 2. The computer offers a complete set of decision/action alternatives, or
Low	1. The computer offers no assistance : human must take all decisions and actions

TABLE 2.1 – Les niveaux d’automatisation de décision et de sélection d’action.

Les échelles de niveaux d’automatisation confrontent l’image réductrice que l’on pourrait se faire sur l’automatisation où le processus est soit entièrement automatisé ou entièrement manuel. Elles décrivent plutôt une automatisation qui peut varier selon un continuum de niveaux, du plus bas : "Manuel" au plus élevé représentant une autonomie complète. Par exemple, au niveau 2 de l’échelle de Sheridan (Tableau 2.1), le système se limite à fournir des options possibles à l’humain qui lui par la suite choisit. Au niveau 4 par contre, le système peut suggérer une alternative de décision à l’humain qui détient toujours l’autorité pour l’exécuter ou d’en choisir une autre. En montant dans les niveaux, au niveau 6 par exemple, le système cette fois propose des décisions et donne à l’humain un temps limité pour les refuser au-delà duquel les décisions seront automatiquement sélectionnées.

Ce modèle a été étendu dans [4] sur la base du modèle simplifié de traitement humain de l’information. Ce dernier répartit ce processus selon quatre étapes. La première concerne l’acquisition et l’enregistrement d’informations issues de sources multiples. Cette étape comprend l’orientation des récepteurs sensoriels, le traitement sensoriel, le pré-traitement initial des données avant la perception complète et l’attention sélective. La seconde étape réside dans la perception consciente et la manipulation des informations traitées dans la mémoire de travail [98]. Elle inclue également les opérations cognitives et inférences qui précèdent la prise de décision. La troisième étape cristallise la prise de décision à l’issue des processus de l’étape précédente. La quatrième et dernière étape décrit la mise en œuvre de l’action correspondant à la décision prise.

Hormis la simplicité évidente de ce modèle qui ne capture par l’ensemble des mécanismes de la cognition humaine, il a permis de proposer une structuration assez proche de la pratique. En effet, ces quatre étapes du traitement de l’information sont souvent transposées lors de la

conception de systèmes automatisés. Par conséquent, le niveau d'automatisation de chacune de ces différentes fonctions peut varier indépendamment comme le montre l'exemple sur la figure 2.1. Cette dernière illustre un système *A* ayant des niveaux d'automatisation moins élevés qu'un système *B*. On relève également sur la figure que pour les deux systèmes chacune des fonctions élémentaires de traitement de l'information détient un niveau d'automatisation propre à elle et qui n'est pas forcément identique aux autres.

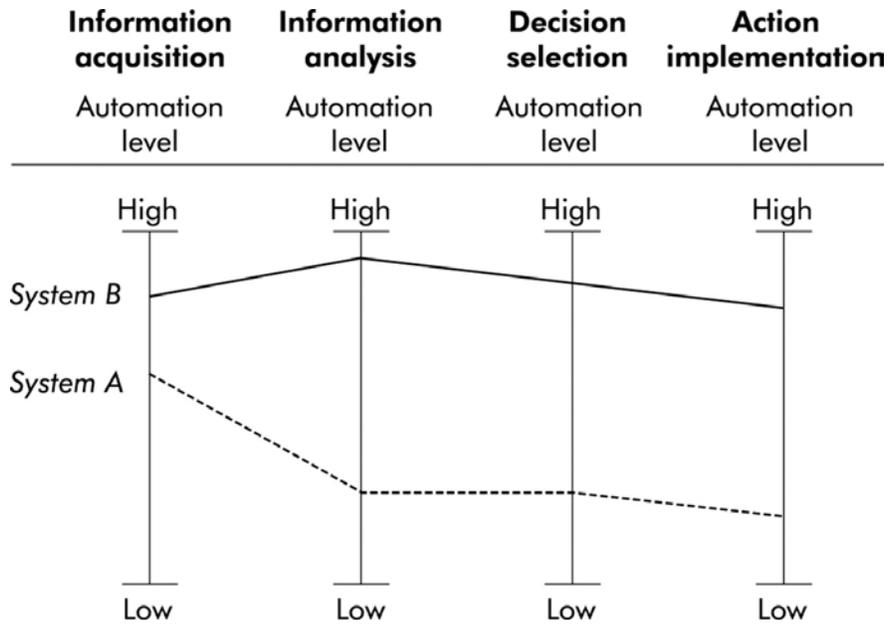


FIGURE 2.1 – Extension des niveaux d'automatisation sur différentes étapes du traitement de l'information (source : [4])

Conformément à l'approche de conception centrée sur l'humain longtemps suivie pour la conception de l'automatisation [99], le niveau d'automatisation devrait être choisi par l'opérateur humain et ne devrait pas être modifié par la machine. Selon cette méthodologie, l'humain devrait toujours avoir l'autorité car c'est à lui que revient la responsabilité du système Homme-Machine global. De plus, l'homme est plus efficace dans la gestion des ressources lorsqu'il maîtrise les changements dans l'état de l'automatisation [100].

Cependant, ce dernier est enclin à l'erreur et risque de ne pas prendre les mesures appropriées dans les cas où sa compréhension de la situation est quelque peu erronée ou incomplète ou dans les cas où il faudrait agir sous forte contrainte temporelle [101]. Par conséquent, un paradigme alternatif appelé "**l'automatisation adaptative**" a été proposé. Il considère la possibilité que le niveau d'automatisation et le mode de fonctionnement puissent être modifiés en temps réel soit par l'humain, soit par la machine [102][103][104]. Les systèmes mettant en pratique ce concept ont été introduits et étudiés depuis les années 90 [105]. Les études

ont d'ailleurs montré que cette méthode pouvait réduire la charge de travail et améliorer les performances [106].

Sur la base de la définition donnée dans [107], les auteurs de [85] [108] ont donné deux conditions minimales qui doivent être remplies afin de qualifier de coopérative une situation entre deux agents. D'une part, chaque agent oeuvre pour atteindre des objectifs qui peuvent naturellement interférer avec ceux de l'autre notamment sur les ressources, les procédures, etc... D'autre part, chaque agent doit essayer de gérer les interférences pour faciliter les activités individuelles et la tâche commune lorsqu'elle existe. Par conséquent, deux principaux attributs définissent un agent coopérant [109]. Le premier est son "**savoir-faire**", qui est la capacité de l'agent à contrôler un processus ou à résoudre un problème d'une manière autonome. Le deuxième représente son "**savoir-coopérer**". Ce dernier est sans doute la composante la plus importante qui lui permet de s'engager dans des activités coopératives avec d'autres entités. Il fait appel à deux classes d'activités qui nécessitent des capacités pour détecter et gérer les interférences avec l'autre agent ainsi que la capacité à faciliter les objectifs de l'autre agent. Ces attributs sont détaillés dans le modèle de coopération Homme-Machine présenté dans [87]. En outre, selon les savoir-faire des agents et leur chevauchement trois formes de coopération sont identifiées [110]. En effet, des agents ayant des capacités similaires peuvent se trouver dans une situation où ils doivent débattre pour trouver la meilleure solution (forme Confrontative), joindre des compétences équivalentes pour effectuer une tâche qui serait impossible individuellement (forme Augmentative) ou apporter des compétences différentes mais complémentaires pour effectuer une tâche nécessitant des compétences qui résultent de cette union (forme Intégrative). Enfin, une autre composante importante pour la coopération Homme-Machine réside dans l'espace de travail commun [111]. Il supporte la coopération en fournissant une plate-forme essentielle pour l'interaction entre les agents coopérants en rassemblant des information sur les objectifs, les activités et les représentation de la situation de chacun. Des concepts assez similaires d'interaction et de coopération peuvent être trouvés dans le domaine de l'intelligence artificielle [112]. Dans le même esprit, les auteurs dans [113] soulèvent dix points essentiels pour faire de l'automatisation un «joueur d'équipe» dans l'activité conjointe entre l'homme et les agents artificiels.

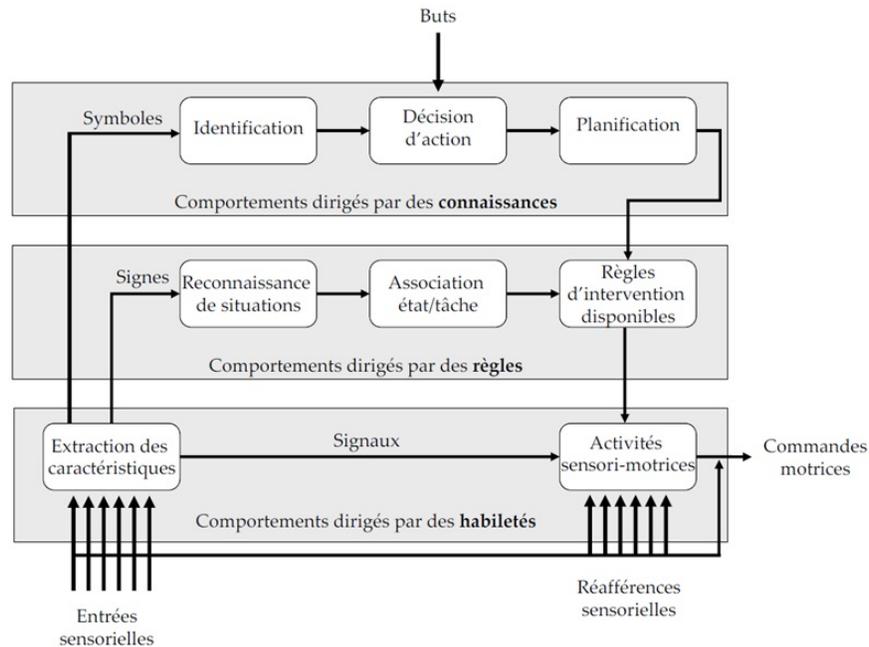


FIGURE 2.2 – : Les différents niveaux de l'activité présentés par Rasmussen [5]

D'une manière générale, comprendre la performance humaine et pouvoir prédire l'erreur pourrait être utile pour bien concevoir l'automatisation. Par conséquent, l'étude de l'activité humaine afin de comprendre les différents mécanismes qui rentrent en jeu était au coeur de nombreux travaux de recherche dont ceux de Rasmussen [5]. Il a classifié l'activité humaine en trois niveaux se distinguant par la nature du processus cognitif qui les caractérise tel que représenté sur la figure 2.2. Ces niveaux d'activités sont régis par des habiletés, des règles et des connaissances et respectent dans cet ordre un niveau d'abstraction croissant de la même manière que le coût en termes de ressources temporelles et cognitives requises. Les activités basées sur des habiletés (*Skill-based behavior*), permettent l'exécution de tâches rapides de l'ordre de l'automatisme sur la base d'entrées sensorielles dites signaux ne nécessitant pas de traitement avant d'être exploitées. Cette catégorie d'activités décrit des tâches routinières qui sont le fruit d'apprentissages et ne requièrent que peu de contrôle attentionnel. Le niveau d'activité basé sur les règles *Rule-based Behavior* occupe une position intermédiaire dans la hiérarchie de traitement de l'information. A ce niveau, l'humain est amené à appliquer des règles dont il dispose ou acquises avec l'expérience afin de répondre efficacement à une situation qui lui est familière. Ces activités se basent sur des signes mettant en lien certaines caractéristiques de l'environnement et des activités à réaliser avec investissement moyen en termes de ressources attentionnelles symboliques. Le troisième niveau regroupe les activités basées sur l'ensemble de connaissances que possède l'individu. Ce niveau de traitement permet de réagir à des situations ne pouvant être gérées par les deux précédents, en manipulant des

symboles définis comme des représentations mentales complexes. L'humain a recours à ce niveau lorsqu'il est confronté à une situation nouvelle. C'est un processus lent et coûteux en ressources cognitives et attentionnelles.

Ces études ont mis en évidence que l'activité humaine pouvait être répartie sur plusieurs niveaux. Par conséquent, et dans un but de compatibilité, les auteurs dans [114] ont souligné le caractère hiérarchique que devrait avoir la coopération et ont défini trois niveaux d'activités coopératives par rapport aux exigences temporelles. En outre, la coopération pourrait prendre différentes formes en fonction du niveau d'activité adressé [115][109]. Par conséquent, les principes de coopération décrits ci-dessus doivent être appliqués conformément à chaque niveau.

2.3 Application au domaine automobile

Les différents concepts de la coopération Homme-Machine présentés dans la section précédente ont été étudiés dans divers domaines : le contrôle du trafic aérien [116][109][94], les chaînes de montage [117], la robotique [118], l'aviation [99][100] etc... Même si l'objectif était de développer une approche générale pour la conception et l'évaluation des systèmes Homme-Machine [119] [109], les différences d'un domaine à l'autre obligent à revoir et à adapter ces principes à chaque situation selon ses spécificités.

Comparé à d'autres domaines tels que l'aéronautique, l'attention accordée au sujet de la coopération homme-machine est assez récente dans le domaine automobile [101][120] [121] [122] [72] [87] [123] [124]. Par ailleurs, malgré les aspects communs entre les deux domaines de transport, les horizons temporels, l'environnement hautement dynamique dans l'automobile, la faible régulation des routes par rapport à la circulation aérienne et la formation professionnelle des pilotes dans l'aviation font que la différence est significative.

Dans ce qui suit, nous détaillons les différents principes de la coopération pour le domaine automobile. Tout d'abord afin de bien comprendre la tâche de conduite nous aborderons les travaux existants sur la modélisation. Après identification des différents niveaux et ainsi le mécanismes les régissant nous reviendrons sur un des points clés de la coopération Homme-Machine et qui concerne la répartition des tâches et de la gestion de l'autorité. Nous parlerons dans un premier temps des niveaux d'automatisation qui posent les prémices d'une répartition prévisionnelle des tâches. Par la suite nous aborderons le point de gestion de l'autorité pour chaque niveau de la tâche de conduite séparément afin d'affiner la répartition d'autorité initialement établie pour le niveau d'automatisation engagé.

2.3.1 Modélisation de la conduite

Pendant longtemps, la conduite automobile a suscité l'intérêt des chercheurs. Elle a été étudiée sous différents aspects [125]. Il existe presque autant de modèles de la tâche de conduite que de chercheurs ayant travaillé sur le sujet. Les modèles diffèrent principalement selon l'application à laquelle ils sont destinés ainsi que selon les aspects qu'ils cherchent à décrire. D'après [6], ces modèles sont soit à caractère descriptif et se limitent à décrire et à catégoriser l'activité de conduite soit fonctionnels en rassemblant un ensemble de fonctions et les relations qui les relient entre elles. Un autre élément qui les distingue est l'aspect sur lequel ils se basent que ce soit l'aspect comportemental ou motivationnel. Dans l'ensemble, deux vastes catégories sont discutées dans [125] : Les modèles descriptifs et les modèles fonctionnels.

Les modèles descriptifs tentent de décrire tout ou partie de la tâche de conduite. Ces modèles sont plutôt analytiques et se focalisent sur ce que fait le conducteur et ce qu'il devrait faire. Ils sont limités et n'incluent pas notamment un aspect prédictif qui permettrait de savoir comment les changements dans la situation, dans les motivations ou encore dans les capacités du conducteur affecteraient la performance de la tâche de conduite, l'évolution du risque de la situation ainsi que les agissements et décisions du conducteur. Parmi ces modèles, il y'a ceux d'analyse de tâche. Ils sont essentiellement basés sur la description des exigences des tâches de la conduite, les exigences comportementales et objectifs concernant la performance et les exigences en termes de capacité pour mener à bien ces tâches. Un des exemples les plus typiques de cette classe de modèles est celui proposé par McKnight et Adams [126]. Les auteurs ont entrepris de décortiquer l'activité de conduite sous forme d'un ensemble de tâches principales et de sous tâches avec les descriptions de chacune d'elles du point de vue des exigences. Ces études trouvent leur application dans l'amélioration des programmes de formation des conducteurs et l'élaboration de normes pour les évaluer.

De façon générale, la conduite automobile inclut une multitude de processus essentiels permettant de faire progresser le véhicule sur la route. Ces derniers diffèrent de par les exigences cognitives et temporelles. Les modèles dits hiérarchiques constituent une autre composante importante des modèles descriptifs. Comme leur nom l'indique, en la présentant sous une forme hiérarchique, ils offrent un découpage généraliste de l'activité de conduite et donnent un cadre global pour l'étude des comportements mis-en jeux.

Un des modèles les plus connus de cette catégorie est le modèle de Michon [6]. Dans son modèle, l'activité de conduite a notamment été répartie sur trois niveaux hiérarchiques : Stratégique, tactique et opérationnel. Ces niveaux se distinguent par les exigences cognitives et les contraintes temporelles allouées aux sous tâches qui les composent.

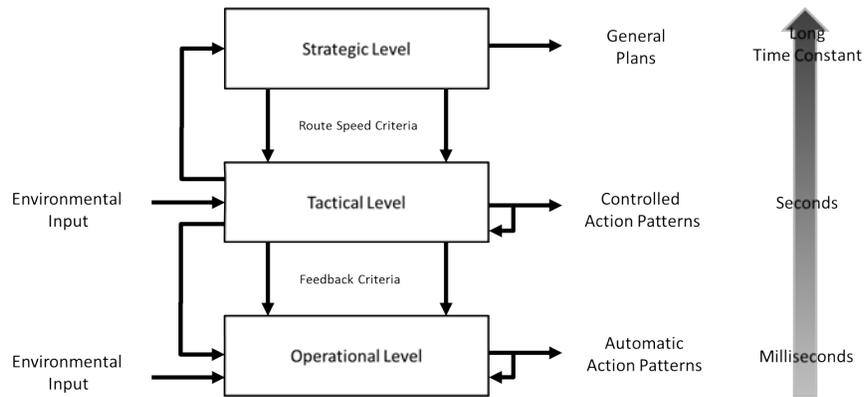


FIGURE 2.3 – : La répartition hiérarchique de l’activité de conduite selon Michon [6]

Tel qu’illustré sur la figure 2.3, au niveau stratégique, plus haut niveau de la tâche de conduite, la planification du trajet global s’effectue notamment en déterminant les objectifs du trajet, l’itinéraire à emprunter suite à une évaluation des coûts, du confort, des risques impliqués etc... A moyen terme, le niveau tactique caractérise les décisions sur les manœuvres permettant d’assurer la progression sur le trajet planifié tout en s’adaptant à la situation qui évolue. En dépit des exigences de la situation, les manœuvres devraient être conformes au plan déterminé au niveau stratégique même si dans certains cas le plan stratégique pourrait être revu pour s’adapter à une manœuvre finalement choisie. Enfin, le niveau opérationnel englobe toutes les actions rapides et continues qu’exerce le conducteur sur le volant et les pédales pour contrôler le véhicule sur la trajectoire qui correspond à la manœuvre établie au niveau tactique. L’intérêt de ce modèle a été celui de mettre en évidence les différents niveaux de l’activité de conduite ainsi que les liens et interactions entre chacun d’eux. Toutefois, il n’offre pas la possibilité de prédire le comportement du conducteur ou l’évolution du risque de la situation. De plus, il ne donne pas d’éléments pour modéliser et comprendre les mécanismes de décision impliqués dans les différents niveaux.

Dans un second temps, les modèles fonctionnels ont été proposés pour pallier à ces limitations. D’un point de vue général, ces modèles tiennent compte de plus de facteurs qui permettent d’introduire un aspect prédictif. Parmi ces modèles figurent les travaux qui modélisent la conduite sous forme de boucle de régulation. Ces modèles portent un regard particulier sur la tâche de guidage du véhicule qui correspond au niveau opérationnel de Michon. Ils offrent une description quantitative du comportement du conducteur à ce niveau à travers une formulation mathématique.

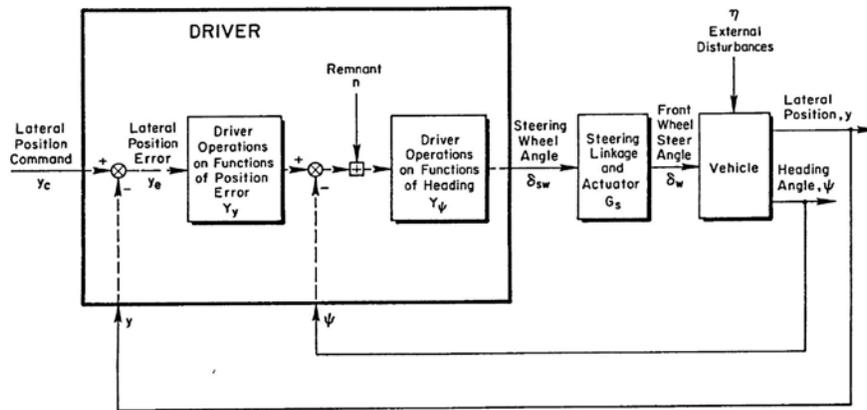


FIGURE 2.4 – : Modèle de la tâche de guidage de McRuer ([7])

Ces modèles ont connu un large engouement durant les années soixante-dix. McRuer a été parmi les premiers à proposer un modèle adapté pour la conduite automobile [7]. L'action de braquage du conducteur a été décrite comme une compensation pour l'erreur de positionnement latéral et l'angle de cap par rapport à la route comme l'illustre la figure 2.4. Plus tard, un modèle qui introduisait deux niveaux de contrôle à savoir le contrôle compensatoire et le contrôle anticipatoire a été proposé par Donges [127]. Ces modèles ont constitué la base pour plusieurs modélisations évoluées qui incluent notamment le système neuromusculaire humain tel que dans [128]. Ils ont permis de modéliser le contrôle latéral du véhicule et ont identifié des paramètres permettant de reproduire différents comportements de braquage notamment le survirage et le sous virage. Par ailleurs, ce type de modèles a trouvé un intérêt dans la conception de lois de commande qui incluent des connaissances sur le conducteur pour faciliter les interactions entre automatisations et conducteur et ainsi réduire les conflits lors d'une conduite partagée. D'autre part ce type de modèles a également été utilisé pour le diagnostic en temps réel de l'état du conducteur en identifiant en ligne les paramètres du modèle et qui à l'issue d'une classification permettent de suivre son évolution [129].

Les modèles motivationnels constituent une autre classe des modèles fonctionnels. Ils tentent de décrire pourquoi les conducteurs choisissent une alternative par rapport à une autre en termes d'utilité et de compromis. D'un point de vue général, on constate que ces modèles tiennent compte de plus de facteurs permettant l'explication du comportement des conducteurs et notamment la prise en compte des différences inter-individuelles qui résultent en des comportements différents pour des situations similaires. A l'issue d'une revue des différents modèles motivationnels, Carsten dans [125] a réuni en cinq principales catégories les facteurs déterminants pour la compréhension de la prise de décision du conducteur. Cette dernière est intrinsèquement liée à la notion de prise de risque et les différents facteurs

s'inscrivent dans les catégories suivantes :

- L'attitude et la personnalité
- L'expérience
- L'état du conducteur et son niveau de dégradation (Perception, Attention et Vigilance)
- La charge de travail exigée par la tâche
- La conscience de la situation

Au sein de cette catégorie de modèles, différentes théories sur la gestion du risque par les conducteurs ont émergé. La théorie de compensation du risque proposée dans [130] avançait que les conducteurs auraient tendance à compenser le niveau du risque perçu pour une situation donnée par leur degré de prise de risque. Typiquement, plus le risque perçu est important et moins la vitesse choisie est élevée. D'autres alternatives peuvent être trouvées dans [131][132]. Ces théories ont tenté de fournir une description mathématique des processus de jugement et de prise de décision impliqués dans la conduite. Selon Ranney [133], l'un des progrès les plus importants dans la modélisation de la conduite a été marqué par sa structuration hiérarchique telle qu'elle a été décrite par Michon. Ce cadre a influencé à la fois les modèles motivationnels et les théories sur l'erreur. Dans la continuité du modèle de Michon les auteurs dans [8] ont mis l'accent sur le caractère hiérarchique du processus de prise de décision dans la conduite et ont proposé un cadre mathématique général qui décrit la conduite aux différents niveaux (figure 2.5). Ce travail a été motivé par les nombreuses critiques précédemment adressées aux modèles motivationnels concernant le manque de spécificité des mécanismes internes ce qui rendait difficile leur validation. Le modèle de Van Der Molen et Botticher a donc été adapté pour décrire la conduite de manière quantitative et jouit de suffisamment de souplesse pour inclure les différentes théories du risque proposées précédemment. De plus, contrairement aux théories classiques du risque qui tentent d'expliquer le comportement de conduite sur la base du risque, des travaux ont souligné que les motivations derrière les décisions ont souvent un caractère multifactoriel [134]. Cet aspect est également pris en considération dans le modèle de Van Der Molen et Botticher [8] lors de la modélisation du mécanisme de jugement et de prise de décision. En effet, en plus du risque encouru, d'autres facteurs tels que le gain de temps concourent pour constituer la motivation qui permet de faire des choix. Ce mécanisme est valable pour le niveau stratégique et le niveau tactique. La particularité au niveau tactique est que le plan défini au niveau stratégique rentre dans les éléments qui constituent les motivations de choisir la manœuvre à exécuter. Au niveau opérationnel résident les différents automatismes qui régissent le contrôle du véhicule ainsi que la gestion de situations d'urgence. Le modèle représente également les interactions ascendantes des niveaux inférieurs qui illustrent entre autre l'influence du choix de certaines manœuvres sur le plan stratégique et la re-planification du trajet en conséquence.

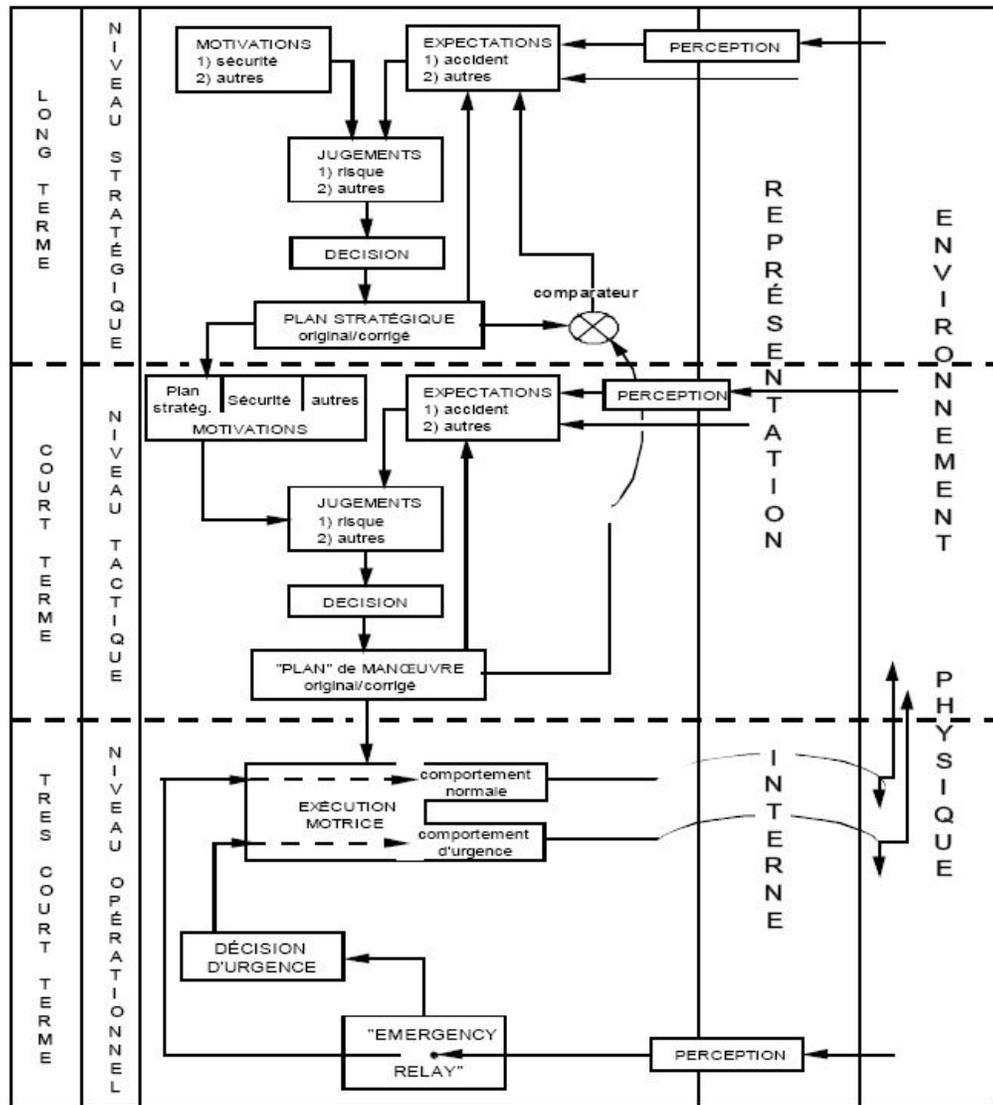


FIGURE 2.5 – : Modèle hiérarchique du risque de Van Der Molen et Bötticher ([8])

D'autres travaux ont tenté de modéliser la cognition humaine dans toute sa complexité à l'exemple du modèle COSMODRIVE [135]. L'objectif étant d'étudier le comportement du conducteur et de comprendre comment il organise efficacement ses activités cognitives et motrices pour interagir avec son environnement. De plus, ces modèles servent également un but de compréhension de l'erreur humaine. Toutefois, la modélisation de tous les mécanismes sous-jacents à la tâche de conduite s'avère être une tâche ardue notamment avec la prise en compte d'informations très précises sur le conducteur dont des facteurs psychologiques sont souvent difficiles à obtenir. Par ailleurs, hormis le fait qu'un tel degré de complexité serait important pour une analyse approfondie du comportement humain il n'est pas indispensable lorsqu'il s'agit de concevoir un système d'automatisation de la conduite dont le savoir-faire

est modélisé pour être optimal et à terme excéderait celui de l'humain. A cette fin, les modèles motivationnels et particulièrement celui de Van Der Molen permettent de mettre en avant les différents niveaux de la tâche de conduite ainsi que les mécanismes décisionnels fondamentaux et constituent une bonne base pour adapter les principes de la coopération homme-machine lors de la conception du système.

2.3.2 Les niveaux d'automatisation

Comme expliqué dans la section précédente, l'allocation des tâches dans le système Homme-Machine conduit à la définition d'échelles de niveaux d'automatisation qui s'étendent entre deux extrémités : Le contrôle manuel et l'autonomie totale. Chaque niveau décrivant le degré d'implication de l'humain et de l'automatisation dans le système Homme-Machine à un moment précis [136].

Dans le but de capitaliser sur les réalisations et les résultats des travaux de recherche ainsi que de définir une feuille de route cohérente pour les développements futurs sur les ADAS en particulier et l'automatisation de la conduite en général, de nombreuses organisations comme la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) et la SAE (Society of Automobile Engineers) ont établi des échelles de niveaux d'automatisation pour le domaine de l'automobile [49] [51]. Ces échelles identifient entre cinq à six niveaux d'automatisation. Chaque niveau représente une répartition à priori de l'autorité et de la responsabilité entre le conducteur et le système. Dans les trois premiers niveaux, le conducteur reste responsable de la tâche de conduite. À partir du niveau 4, l'automatisation a la responsabilité de conduire le véhicule durant les différentes situations qui pourraient être rencontrées.

Les systèmes qui contrôlent une partie de la tâche de conduite appartiennent au premier niveau d'automatisation comme par exemple l'*ACC* et le *LKA*. Cependant, lorsque nous considérons un système automatisant la tâche de conduite dans son ensemble, on peut imaginer un système dont les fonctionnalités se répartissent sur tout ou partie des niveaux d'échelle d'automatisation. Dans ce cas, les transitions d'un niveau à l'autre peuvent se produire selon différents facteurs à mesure que la situation de conduite évolue. Il s'agit là d'une question de recherche importante car il est nécessaire de s'assurer que les transitions sont sécurisées et que le conducteur reste conscient du mode engagé. Une transition qui attire l'attention des chercheurs en particulier est la transition d'un mode hautement automatisé au contrôle manuel. Ce scénario peut être rencontré spécialement lorsque le système est incapable de gérer une situation ou lorsqu'il atteint ses limites. Les problèmes de sécurité qui pourraient survenir dans ce cas sont évidents, en particulier si le conducteur est en dehors de la boucle de contrôle et que sa conscience de la situation est altérée en raison d'une longue période de conduite hautement automatisée.

Il a été montré dans [137] que l'augmentation du niveau d'automatisation n'était pas le seul facteur qui affectait négativement l'attention du conducteur, mais le type d'assistance fournie par l'automatisation y jouait un rôle également. En effet, la délégation de contrôle latéral à un système entraînait plus de désengagement du conducteur par rapport à la délégation de contrôle longitudinal. De ce fait, l'étude du comportement des conducteurs avec les systèmes qui prennent en charge tout ou une partie du contrôle est cruciale pour bien concevoir les interactions du système Homme-Machine. Le cas de la reprise en main a été le sujet de plusieurs études. Le temps nécessaire pour reprendre le contrôle après une phase de conduite automatisée a été étudié dans [138]. Il a été constaté que les conducteurs en état de distraction avaient besoin d'environ 35 à 40 secondes pour stabiliser le contrôle latéral du véhicule. Une autre étude a mis en évidence l'impact négatif qu'avait la densité de trafic sur la qualité et le temps de la reprise en main [139]. Le cas de la reprise de contrôle a été également étudié pour le cas d'un évitement manuel d'un obstacle non détecté par le système automatisé [140] [141]. L'étude [140] a exposé la difficulté de revenir au contrôle manuel pour l'évitement de l'obstacle, résultat confirmé dans [141] qui a également révélé un changement dans le comportement du regard lors de la délégation du contrôle latéral.

Du point de vue de la coopération homme-machine, les transitions entre ces différents modes de fonctionnement ou niveaux d'automatisation à proprement parler sont une forme d'allocation dynamique des tâches représentant ainsi la répartition a priori de l'autorité et des responsabilités entre le conducteur et le système qui peuvent évoluer dans le temps. Afin d'assurer la sécurité au sein du système Homme-Machine, ces transitions doivent tenir compte de divers facteurs tels que l'état de fonctionnement des différents capteurs, le contexte de conduite, les requêtes du conducteur, son état et ses actions sur les organes de commande du véhicule pour sélectionner un niveau particulier.

Inspiré de la relation du cavalier avec son cheval, Flemisch [120] a proposé ce qu'il appelle la "**H-Metaphor**" ou métaphore du cheval afin de décrire la relation que le conducteur devrait avoir avec le véhicule automatisé. Il a proposé différents modes en fonction de la répartition de l'autorité et de la responsabilité entre le conducteur et le véhicule et cela, en fonction de l'engagement du conducteur et des capacités de l'automatisation.

Ces modes de fonctionnement peuvent être considérés comme une forme de niveaux d'automatisation où la transition d'un mode à l'autre est gérée au moyen d'une unité de médiation d'interaction [142]. De même, les transitions entre différents niveaux d'automatisation ont été modélisées en tant que machine d'état [72] et en utilisant des réseaux de Petri colorés dans [143].

2.3.3 La coopération Multi-niveau

Compte tenu de la nature hiérarchique de l'activité humaine telle que représentée dans [5][6], de nombreux auteurs affirment que la coopération doit également être hiérarchique [114] [144]. L'idée d'une coopération à plusieurs niveaux a été proposée dans le contrôle du trafic aérien dans [116][115].

Bien que les premiers pas vers l'automatisation dans le domaine de l'automobile se limitaient à une automatisation partielle à l'exemple de l'*LKA* et de l'*ACC*, la tendance actuelle se dirige vers des systèmes d'automatisation complète intervenant sur l'ensemble du processus de la conduite. Par conséquent, afin d'assurer une coopération réussie avec l'automatisation, il faudrait tenir compte de l'aspect hiérarchique de la tâche de conduite et veiller à ce que la coopération s'étende aux différents niveaux. Ce faisant, l'automatisation conçue refléterait l'humain et serait donc compatible avec sa représentation cognitive de la tâche de conduite [145] [124].

Le modèle de de Michon [6] identifie trois niveaux différents dans lesquels les activités de la tâche de conduite globale sont réparties : Stratégique, Tactique et Opérationnel. De plus, le niveau tactique peut être divisé en un niveau de manoeuvre responsable de la décision de manoeuvre et d'un niveau de trajectoire où la trajectoire correspondante est planifiée [86][124]. Ceux-ci sont considérés comme les niveaux d'interaction entre le système et le conducteur, comme le montre la figure 2.6.

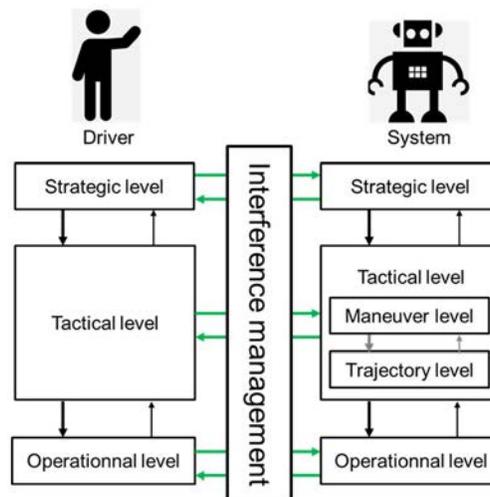


FIGURE 2.6 – Niveaux d'interaction entre le conducteur et le véhicule automatisé

Par conséquent, afin d'avoir une coopération complète, une interaction appropriée entre le conducteur et l'automatisation ainsi que les mécanismes de gestion de l'autorité pour la résolution des interférences doivent être présents à chaque niveau. Comme indiqué dans [146],

la gestion des interférences est au cœur de la coopération. Dans ce qui suit, nous détaillons ces concepts sur les différents niveaux de la tâche de conduite.

2.3.4 La gestion des interférences à travers les niveaux de la conduite

Les interférences résultent de l'impact de l'action d'un agent sur l'objectif d'un autre. De plus, comme expliqué dans [112][108], les interférences peuvent être positives ou négatives. Lors de la conception de la coopération homme-machine, les interférences négatives sont sans doute les plus importantes à traiter puisqu'elles peuvent occasionner une gêne au conducteur dans le meilleur des cas [147] ou conduire à des situations extrêmement dangereuses au pire des cas [148].

Les interférences négatives sont également appelés conflits dans la littérature [149]. L'auteur [149] développe sur la nature des conflits dans la conduite automatisée. Il les définit comme la situation durant laquelle les actions de contrôle du conducteur et celles du système ne sont pas cohérentes. Cependant, cela pourrait cacher un conflit aux niveaux supérieurs de la tâche de conduite.

Par exemple, l'auteur dans [150] souligne que le changement de voie et le maintien de voie sont deux objectifs opposés qui ne peuvent être atteints simultanément. Par conséquent, les interférences entre le conducteur et le système au niveau opérationnel peuvent être liées à la modification de l'objectif tactique de l'un d'entre eux. En fait, si la manœuvre souhaitée par le système diffère de celle souhaitée par le conducteur, ou dans le cas où la manœuvre souhaitée est cohérente, mais la trajectoire planifiée par le système ne correspond pas à celle planifiée par le conducteur, le conflit devrait être résolu au niveau tactique [151] [152].

2.3.4.1 Au niveau stratégique

Au niveau stratégique, les systèmes de navigation fournissant des informations sur l'itinéraire se sont progressivement répandus dans la flotte automobile, en particulier avec la possibilité aujourd'hui d'utiliser les téléphones portables comme systèmes de navigation. Ces systèmes constituent un outil de voyage précieux qui contribue en même temps à l'économie du temps et de l'énergie. Les systèmes de navigation d'aujourd'hui disposent de capacités coopératives intéressantes notamment en offrant une bonne interaction avec le conducteur avec la possibilité de suggérer de multiples trajets selon les préférences de ce dernier. En outre, l'efficacité des algorithmes atteinte aujourd'hui permet une adaptation dynamique du trajet si le conducteur s'écarte de la route initialement planifiée [153]. Cela représente une forme de résolution de conflit au niveau stratégique.

2.3.4.2 Au niveau tactique

Les progrès récents en matière de perception et d'intelligence artificielle ont permis de doter la machine de la capacité de raisonnement rendant possible la prise de décision dynamique ce qui a permis à des systèmes qui agissent au niveau de la manœuvre d'émerger. Prenons l'exemple de l'*ACC*, ce système prend en charge le contrôle longitudinal du véhicule et compte tenu de la vitesse et de l'inter-distance souhaitée par le conducteur, choisit entre le maintien de la vitesse spécifiée en l'absence de véhicule devant et le suivi de véhicule pour respecter l'inter-distance choisie.

Le contrôle latéral est également adressé au niveau de la manoeuvre. Au vu du nombre important d'accidents liés aux manoeuvres de changement de voie, de nombreuses études se sont orientées vers le développement d'ADAS qui fournissent au conducteur une assistance pendant cette manoeuvre. Deux types de systèmes d'aide au changement de voie peuvent être distingués. Le premier procure une aide passive au conducteur sans agir sur le niveau de contrôle. Ces systèmes informent le conducteur de la faisabilité du changement de voie et l'accompagnent avec des recommandations sur l'exécution de la manoeuvre [154] [37]. La seconde catégorie inclut des systèmes actifs qui non seulement alertent le conducteur mais interviennent lorsque la manoeuvre est dangereuse [34]. Par ailleurs, des systèmes plus avancés de conduite automatisée "*Automated Highway Systems (AHS)*" [155] peuvent gérer la conduite sur autoroute et ont la capacité de décider de la manoeuvre adaptée et de l'exécuter. Dans ce cas, la coopération au niveau tactique se caractérise par le choix concerté de la manoeuvre à exécuter malgré le fait que les deux entités (l'homme et la machine) ont un processus spécifique de perception et de prise de décision. Par conséquent, lorsque le conducteur et le système arrivent à des décisions contradictoires, l'arbitrage est crucial pour attribuer l'autorité de décision finale [152].

En fait, l'origine des conflits tactiques peut varier. Elle peut être liée à un état de distraction ou de fatigue qui altère la conscience de la situation du conducteur et le rend incapable d'évaluer le danger de la manoeuvre engagée. Par exemple, ne pas remarquer la présence d'un véhicule dans l'angle mort lors de l'initiation d'un changement de voie. Dans le cas où plusieurs manoeuvres sont possibles, le conducteur et le système peuvent prendre différentes décisions sur la manoeuvre la plus appropriée. Un autre facteur provoquant des conflits vient du fait que le conducteur et le système n'ont pas nécessairement la même perception du risque. Par conséquent, le système pourrait juger une situation dangereuse lorsque le conducteur décide autrement.

Conduct-by-Wire est un concept qui permet de conduire le véhicule en se basant sur les manoeuvres [86]. Le conducteur agit sur le niveau tactique uniquement et conduit le véhicule à travers une interface permettant de sélectionner les manoeuvres à exécuter. Les tâches

consistant à planifier les trajectoires correspondantes et actionner le véhicule sont déléguées au système. Bien qu'intéressant, ce concept modifie la méthode de conduite. De plus, en conduisant à travers l'IHM, le conducteur perd l'interaction directe avec les commandes du véhicule. Dans ce cas, une perte de compétence [84] pourrait être relevée pour des périodes prolongées de conduite avec ce système. Cette perte de compétences pourrait s'avérer critique avec les systèmes de conduite automatisés actuels dont le risque de défaillance reste élevé, en particulier lorsque des situations de reprise en main sans préavis peuvent être rencontrées. Contrairement à *Conduct-by-Wire*, la coopération multi-niveaux suppose une structure de coopération horizontale avec le système et le conducteur qui agissent simultanément sur plusieurs niveaux de la tâche de conduite [152]. De cette manière, la méthode de conduite reste inchangée et le conducteur pourra garder le contrôle du véhicule à travers les organes de commande (volant et pédales). Dans ce cas, l'inférence des intentions du conducteur est essentielle pour détecter des décisions conflictuelles, et le cas échéant, effectuer un arbitrage.

Le deuxième niveau d'interaction au niveau tactique est le niveau de la trajectoire. Un premier aspect de la coopération réside dans la possibilité d'un paramétrage hors ligne du module de planification de trajectoire afin que les trajectoires générées soient mieux adaptées aux préférences du conducteur [156]. Cependant, il est presque impossible de générer une trajectoire qui corresponde parfaitement à celle désirée par le conducteur. Par conséquent, des approches de planification qui tiennent compte de l'action de braquage du conducteur ont été proposées afin de modifier localement les trajectoires [157] [158].

2.3.4.3 Au niveau opérationnel

Il existe différentes méthodes pour permettre la coopération au niveau opérationnel. La première approche qu'on abordera consiste à intégrer suffisamment de connaissances sur le conducteur lors de la phase de conception du contrôleur de telle sorte que le système reproduise le comportement du conducteur et cela dans le but de minimiser les interférences négatives qui risquent d'apparaître.

A cet effet, la modélisation du conducteur a été d'une grande utilité. La modélisation du contrôle latéral des conducteurs a été un sujet de recherche depuis les années soixante-dix [7]. Sentouh et al. [128] a proposé un modèle de conducteur pour le contrôle latéral qui a introduit suffisamment de paramètres pour reproduire une grande variété de styles de conduite, en particulier les comportements de négociation des virages, comme le sur-virage et le sous-virage. De plus, l'écriture du modèle sous la forme d'une représentation d'état a permis son intégration directe dans le contrôleur. Plusieurs travaux ont donc exploité cette idée pour proposer des méthodologies de conception de contrôleurs qui tiennent compte explicitement du conducteur en intégrant des modèles similaires [159] [160] [161]. Cela a permis d'avoir une meilleure interaction au niveau du volant car le contrôleur offrait plus de cohérence avec les

actions du conducteur.

En revanche, les modèles de conducteurs ne sont jamais parfaits et malgré tous ces efforts les interférences négatives ne sont pas entièrement résolues. Pour cette raison, des stratégies de gestion de l'autorité doivent être mises en place afin d'arbitrer entre le conducteur et les actions du système en cas de conflit. La manière la plus simple de traiter cette question est de voir la tâche de contrôle comme une tâche déléguée à l'automatisation qui se désengage dès que le conducteur agit sur le volant. Les limites de cette approche ont été révélées dans [140][141]. Ces études ont mis en évidence la difficulté de la reprise du contrôle manuel en raison du changement brusque d'autorité.

Contrairement à la délégation du contrôle latéral qui met le conducteur dans une position de superviseur, le contrôle partagé haptique a été exploré comme une alternative qui permet une interaction intuitive et qui répond mieux aux directives de conception de l'automatisation [162][122][147][123]. En effet, tout en gardant l'humain dans la boucle de contrôle, cette méthode offre une interaction continue car les actions du système sont continuellement ressenties et le conducteur est libre de les contrer en cas d'erreur du système ou d'objectif différent. De plus, les études ont montré que le contrôle partagé haptique permettait d'avoir un contrôle plus rapide et plus précis du véhicule tout en diminuant l'effort de contrôle requis ainsi que le besoin d'attention visuelle [122]. Le contrôle partagé haptique est décrit comme un spectre continu s'étendant entre le contrôle manuel et l'automatisation complète, et le niveau d'autorité haptique (LoHA : Level of Haptic Authority) définit la répartition de l'autorité de contrôle entre le système et le conducteur [147]. Par ailleurs, le besoin d'assistance du conducteur peut évoluer en fonction de la situation. Certains travaux se sont intéressés à la conception d'approches permettant de gérer dynamiquement l'autorité entre le conducteur et le système d'assistance [163][73][161]. Le but étant de permettre un partage continu et s'adaptant en temps réel à la situation de conduite et à l'état du conducteur.

2.4 Architecture pour la coopération multi-niveau

Les sections précédentes ont mis en évidence les principes théoriques qui devraient être considérés afin d'assurer une conception efficace d'un système de conduite automatisé coopératif.

En pratique, il est nécessaire d'avoir une architecture fonctionnelle permettant d'intégrer ces principes. Les architectures fonctionnelles classiques pour les systèmes automatisés de conduite [164] respectent souvent la structuration hiérarchique de la tâche de conduite proposée en psychologie cognitive [6]. Toutefois, étant destinées uniquement à la conduite autonome, ces architectures ne contiennent pas les fonctionnalités nécessaires pour assurer la coopération avec un conducteur qui partage la tâche de conduite.

La figure 2.7 présente notre proposition d'une architecture augmentée avec les fonctionnalités nécessaires pour appliquer les principes de la coopération Homme-Machine aux différents niveaux de la tâche de conduite.

2.4.1 Généralités

La structure modulaire fournit un cadre flexible permettant l'intégration des différentes fonctionnalités et algorithmes existants qui peuvent être facilement remplacés par des futurs développements.

L'architecture se basant sur les connaissances issues de la modélisation du comportement humain de la conduite a pour but de garantir des interactions appropriées à chaque niveau de la conduite et ainsi assurer une coopération multi-niveau garantissant une bonne compatibilité avec le conducteur. Elle est donc répartie selon les trois niveaux du modèle de Michon.

L'interaction entre le conducteur et le système au niveau tactique est assurée au moyen de l'IHM et du module de détection d'intention. Au niveau opérationnel, l'interaction est supportée par la modalité haptique à travers le volant. Les modules du système utiles à la coopération Homme-Machine sont décrits dans ce qui suit selon le niveau de la conduite auquel ils appartiennent (se référer à la figure 2.7 pour situer les modules et leurs interactions).

2.4.2 Niveau stratégique

"Route and strategic plan definition" : Ce bloc réunit les fonctionnalités habituelles d'un système de navigation à savoir le calcul d'un itinéraire selon un certain nombre de critères. Par ailleurs, il offre des fonctions supplémentaires notamment avec la transmission d'informations du plan stratégique qui sont utilisées lors de la prise de décision sur la manœuvre. De plus, ce module assure la planification globale en fournissant les points de passage qui sont essentiels au module de planification de trajectoire.

2.4.3 Niveau tactique

En plus des sous tâches classiquement liées à la conduite à ce niveau et qui relèvent de la décision sur la manœuvre et la planification de trajectoire, des fonctions supplémentaires visant à apporter des informations utiles à la coopération sont ajoutées.

La structure du module de décision sur la manoeuvre ("**Maneuver decision**") est illustrée sur la figure 2.8 :

"Possible Manoeuvres" : d'un point de vue cognitif, le traitement de l'information et de la prise de décision passe par une catégorisation de la situation [165]. Cette dernière s'effectue en déterminant un ensemble de manœuvres pertinentes par rapport de la situation de conduite en cours. Par exemple, les manœuvres possibles lors d'une conduite sur autoroute avec une

circulation modérée sont : le maintien de vitesse, le suivi de véhicule, les dépassements et la sortie d'autoroute. Dans [154], le système d'aide à la décision de changement de voie considère trois manœuvres : changement de voie vers la droite, changement de voie vers la gauche et maintien de voie. Dans [156], la combinaison de trois manœuvres longitudinales (accélérer, décélérer et maintenir la vitesse) et trois manœuvres latérales élémentaires (maintien de voie, changement de voie vers la gauche et changement de voie vers la droite) permet de former une grille de neuf manœuvres possibles.

"Maneuver Ranking" et "Motivations" : les modèles motivationnels décrivent le mécanisme de décision responsable notamment du choix des manœuvres. Van Der Molen et Bötticher ont décrit ce processus comme une évaluation de l'utilité de chaque alternative sur la base des motivations et des attentes qui y sont liés [8]. Ce modèle est pris comme référence pour la prise de décision au niveau tactique afin d'imiter le comportement du conducteur. La méthode de prise de décision est présentée dans la section 3.4.

"Trajectory definition" : Ce module assure la planification locale de la trajectoire. A l'issue du choix de la manœuvre dans les modules précédents, il transforme la décision de haut niveau en une trajectoire réalisable qui tient compte de la dynamique de l'ego-véhicule et des risques de collision avec les obstacles pour les prochaines secondes. L'approche de planification développée offre la possibilité d'adapter en temps réel la trajectoire du système pour tenir compte de l'action du conducteur sur le volant. Celle-ci est détaillée dans la section 4.2.

"Driver Assessment" : l'information sur le conducteur est très utile lors de la gestion des interférences et de l'autorité. Elle peut indiquer si le conducteur agit consciemment sur le volant, s'il est conscient de la situation de conduite ou même s'il est prêt à reprendre le contrôle. L'information sur l'état du conducteur peut donc être utilisée par le système afin d'adapter l'assistance à ses besoins. En fait, lorsque le conducteur manifeste des signes de distraction ou lorsqu'il est fatigué, sa conscience de la situation et ses performances de conduite sont susceptibles de se détériorer. Dans ce cas, il serait intéressant que le système augmente son autorité pour maintenir la sécurité du véhicule. Un état détérioré du conducteur sain peut être imputé à deux facteurs : la distraction et la fatigue. De nombreuses méthodes d'évaluation de l'état du conducteur existent (voir [166] pour une revue de littérature). Aussi, des solutions commerciales pour la surveillance des conducteurs alliant caméras et techniques de traitement d'images peuvent être trouvées sur le marché [167].

Les techniques de détection des mains permettent d'avoir l'information sur la position des mains sur le volant ce qui peut être intéressant à considérer par exemple lors d'un transfert d'autorité au conducteur.

"Driver Intention" : l'interaction est un aspect essentiel de la coopération. Au niveau

tactique, l'interaction avec le système est soit explicite soit implicite. En effet, le conducteur doit pouvoir exprimer explicitement la manœuvre désirée par le biais de l'IHM. De plus, le système devrait être capable d'inférer implicitement les intentions du conducteur si ce dernier initie des manœuvres en agissant directement sur les commandes du véhicule.

La reconnaissance des intentions exploite le fait qu'il y ait une phase de préparation avant de commencer une manœuvre et une modification du comportement de conduite pendant son exécution. De ce fait, l'analyse des données sur le conducteur, le véhicule et son environnement permet d'anticiper ou reconnaître l'intention du conducteur.

La connaissance des intentions du conducteur est nécessaire dans le module de gestion de l'autorité afin de détecter un éventuel conflit et donc arbitrer pour décider s'il faudrait céder au conducteur et mettre à jour le plan tactique du système ou s'il faudrait rejeter son action [152]. Ce module est présenté plus en détail dans la section 3.3.

"Authority Management" : la gestion de l'autorité est un élément clé pour une coopération réussie. Les rôles du module de gestion d'autorité sont multiples. Tout d'abord, sélectionner le niveau d'automatisation (le mode de fonctionnement) qui détermine la répartition à priori (prévisionnelle) de l'autorité et de la responsabilité. En généralisant l'idée du contrôle partagé aux différents niveaux de la conduite, la distribution d'autorité devrait être affinée afin de mieux s'adapter à la situation. Par conséquent, le deuxième rôle de cette fonction est de détecter et identifier la nature des conflits entre le conducteur et le système et gérer dynamiquement leurs autorités respectives sur les différents niveaux de la tâche de conduite afin de résoudre le conflit de manière adéquate.

Au niveau stratégique, compte tenu de la nature de la tâche de planification d'itinéraire et de l'horizon temporel important qu'il nécessite, les conflits ne sont pas critiques pour la sécurité générale du système homme-machine. Par conséquent, les mécanismes d'interaction et de gestion des conflits déjà présents dans les systèmes de navigation conventionnels sont suffisants. Cependant, si un conflit est lié au niveau tactique, par exemple, le conducteur initie une manœuvre qui n'est pas considérée pertinente par le système et vice-versa, l'arbitrage doit être effectué pour déterminer à qui reviendrait l'autorité de la décision et donc si le système cède au conducteur et met à jour plan tactique ou le rejette. Lorsque le conflit est lié au niveau de la trajectoire, la trajectoire planifiée devrait être modifiée pour mieux correspondre au besoin du conducteur [157]. Les détails de l'implémentation sont expliqués dans la section 3.2.3.

Au niveau opérationnel, le but de la gestion de l'autorité consiste à déterminer la répartition des efforts que le conducteur et le système doivent mettre sur le volant (LoHA). Si l'autorité va au conducteur, le système réduit le couple de braquage au niveau de la direction ce qui permet au conducteur de diriger facilement le véhicule. Sinon, le système

délivre la totalité du couple d'assistance nécessaire au suivi la trajectoire planifiée réduisant dans ce cas la capacité du conducteur à tourner le volant l'obligeant de fournir un effort plus important.

2.4.4 Niveau opérationnel

"Control Stage" : L'étage de contrôle constitue le niveau opérationnel du système. Il se compose des contrôleurs longitudinal et latéral. Afin de permettre la coopération au niveau opérationnel, la structure de contrôle doit satisfaire les exigences décrites dans (2.3.4.3) et ainsi synthétiser le contrôleur en prenant en compte un modèle Conducteur Véhicule Environnement (CVE) avec une identification préalable des paramètres du modèle de conducteur. De plus, la stratégie de contrôle devrait inclure la possibilité d'adaptation en ligne du niveau d'assistance (LoHA) selon les exigences des mécanismes de gestion de l'autorité pour le contrôle latéral [163; 160; 161] et pour le contrôle longitudinal [168]. Les détails de la structure de contrôle latéral sont exposés dans (§ 4.3).

2.4. Architecture pour la coopération multi-niveau

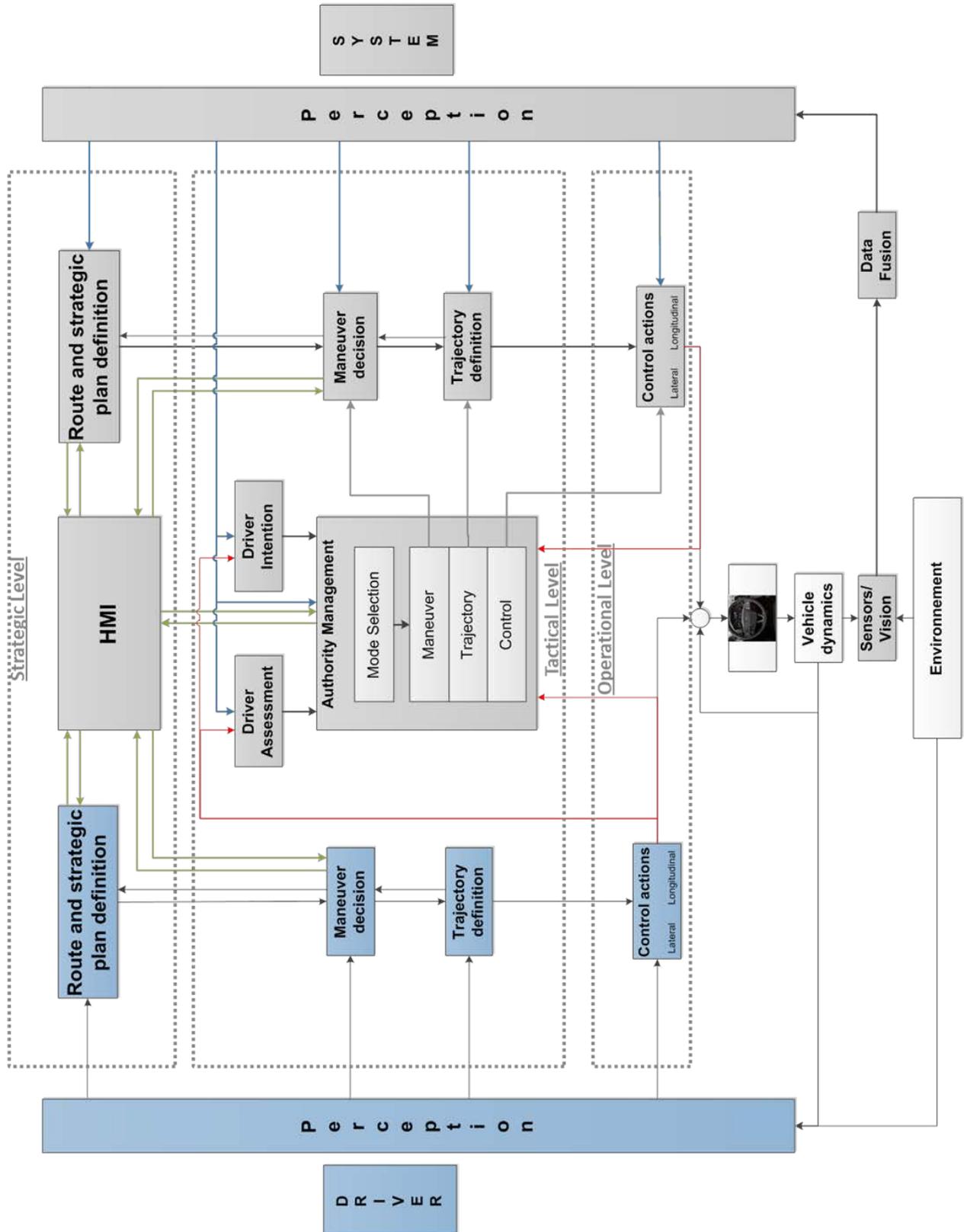


FIGURE 2.7 – Architecture pour la coopération Multi-niveau

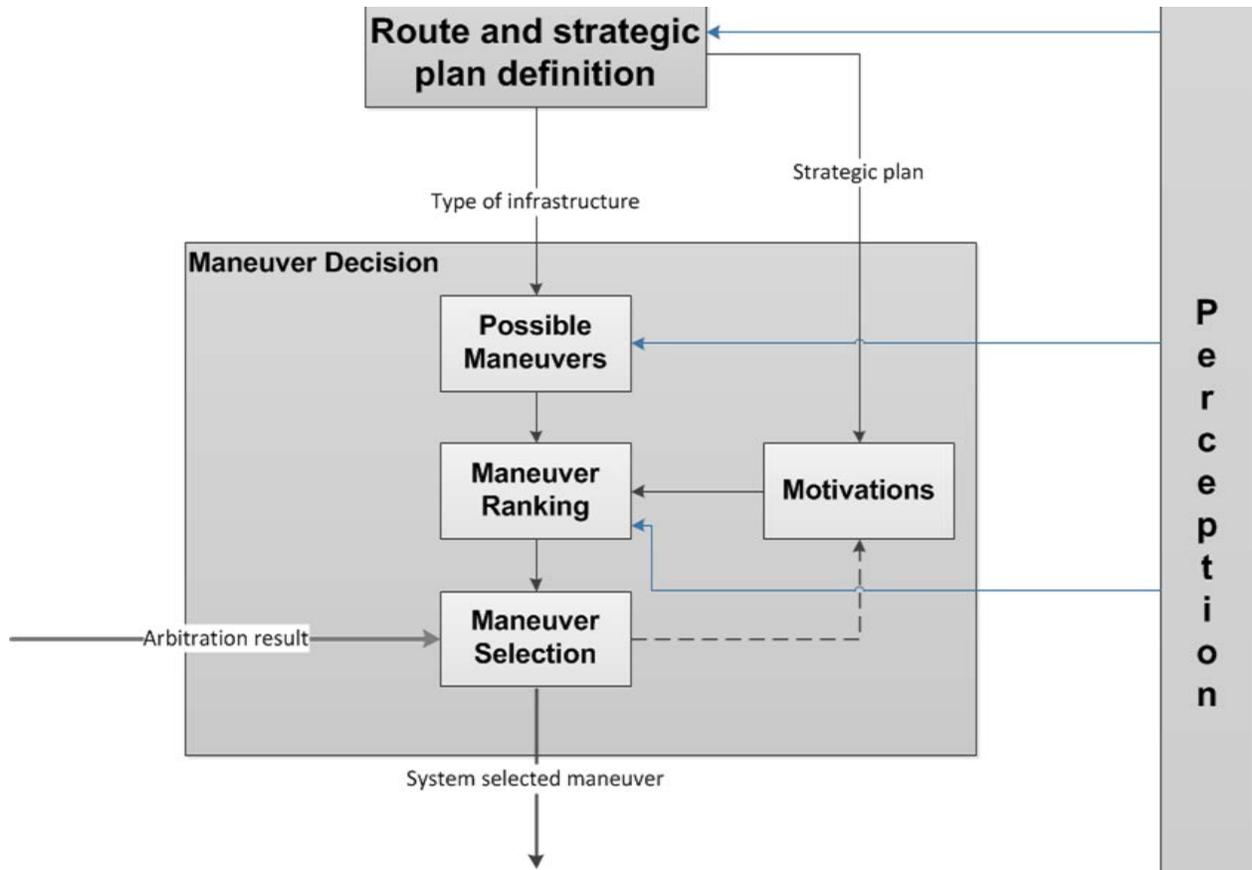


FIGURE 2.8 – Détails du module de prise de décision sur la manœuvre

2.5 Cas d'usage pour l'étude de la coopération Homme-Machine Multi-niveau

Le choix d'un scénario est essentiel pour cadrer les développements car les différentes fonctionnalités et algorithmes dépendent souvent du type de situation traitée.

Le cas d'usage choisi devra inclure des situations pertinentes par rapport à la question de recherche, et plus particulièrement dans le cadre de ce travail visant à étudier la possibilité de coopérer à plusieurs niveaux à savoir les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

A cet effet, la conduite sur autoroute se prête parfaitement à cet objectif car celle-ci reste au coeur des développements de la majorité des systèmes existants. Elle rassemble de nombreuses situations intéressantes qui font appel à des activités réparties sur les différents niveaux de la conduite comme l'illustre la figure 2.9.

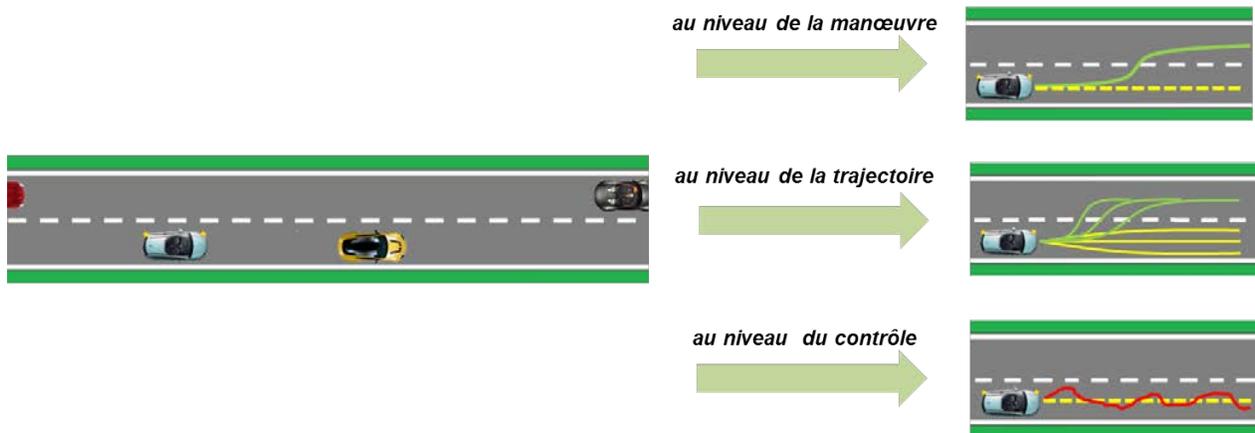


FIGURE 2.9 – Les différentes possibilités de coopération pour une scénario de conduite sur autoroute

Nous accorderons un intérêt particulier au scénario de changement de voie. Cette manoeuvre très fréquente lors de la conduite sur autoroute a capté l'attention des chercheurs pour l'enjeu sécuritaire qu'elle représente. En effet, les manoeuvres de changement de voie comptent pour une très grande portion des accidents sur autoroute [169]. De plus, plusieurs niveaux d'activité du conducteur sont mis en jeu notamment avec le choix d'engager la manoeuvre, son exécution et l'impact qu'elle aura sur l'accomplissement du plan stratégique poursuivi. Les accidents lors de cette manoeuvre ont souvent des conséquences lourdes et sont liés pour la plupart des cas à l'erreur humaine (distraction, fatigue etc...). Ce scénario constitue donc un cas d'étude intéressant pour évaluer la coopération multi-niveau et assurer une bonne interaction entre le système et le conducteur.

2.6 Conclusion

Les progrès techniques encourageants dans la conduite automatisée et la commercialisation des premiers systèmes ont ravivé l'intérêt porté pour le sujet des facteurs humains et de la coopération homme-machine dans le domaine de l'automobile. En dépit de l'expérience accumulée avec l'automatisation dans d'autres domaines tels que l'aviation, plusieurs questions doivent encore être traitées en ce qui concerne le domaine de l'automobile. Aujourd'hui, un grand nombre de recherches ont déjà été menées sur ce sujet conduisant à de nombreux résultats que ce soit du point de vue technique mais également en ce qui concerne les facteurs humains. Ces études ont mis en évidence de nombreuses lignes directrices de conception permettant d'éviter les pièges d'automatisation. La question a été abordée sous plusieurs angles et traite à chaque fois un aspect particulier du problème. Dans cette thèse nous tentons de répondre à la nécessité de regarder le problème dans son ensemble en proposant un cadre qui agrège de manière cohérente les différents résultats obtenus à ce jour.

Après avoir passé en revue les développements techniques et les fonctionnalités disponibles pour les systèmes d'assistance au conducteur avec les principes de la coopération homme-machine en tête, nous avons proposé une architecture qui essaye de répondre à l'objectif susmentionné.

Dans cette architecture, la coopération s'articule autour de l'interaction, de la détection et de la résolution des conflits dont la nature change selon la tâche considérée. Compte tenu de la nature hiérarchique de la tâche de conduite, nous avons adapté les principes de coopération aux différents niveaux : stratégique, manœuvre, trajectoire et contrôle.

Nous pensons que la meilleure coopération que nous pouvons accomplir provient de la combinaison et de son organisation sur ces différents niveaux. Par conséquent, avant de faire des choix concernant la meilleure façon de coopérer et d'écartier la multitude de possibilités qui existe, nous devons évaluer et étudier les avantages de la coopération à chaque niveau et comprendre l'impact de leurs combinaisons.

Chapitre 3

Fonctions de haut niveau pour la coopération

3.1 Introduction

Le chapitre précédent a mis à plat les principes qui ont permis de définir l'architecture dédiée à l'intégration du concept de coopération homme-machine multi-niveau. Le choix du scénario pour la validation de ces principes était essentiel pour cadrer les développements des divers modules. La figure 3.1 illustre une architecture de contrôle simplifiée qui découle de l'architecture proposée dans le chapitre précédent.

Celle-ci dépeint une hiérarchie à travers les modules. Nous mettons en évidence deux classes qui se distinguent par la nature de leur fonction. Des modules qui relèvent de la décision à l'exemple du choix de la manœuvre à exécuter ou la répartition de l'autorité entre le conducteur et le système. Ils permettent de générer des informations de haut niveau qui régissent des modules se situant dans un niveau plus bas et qui les mettent en exécution.

Dans ce chapitre nous aborderons les développements de ces modules de haut niveau qui apparaissent dans le cadre vert sur la figure 3.1.

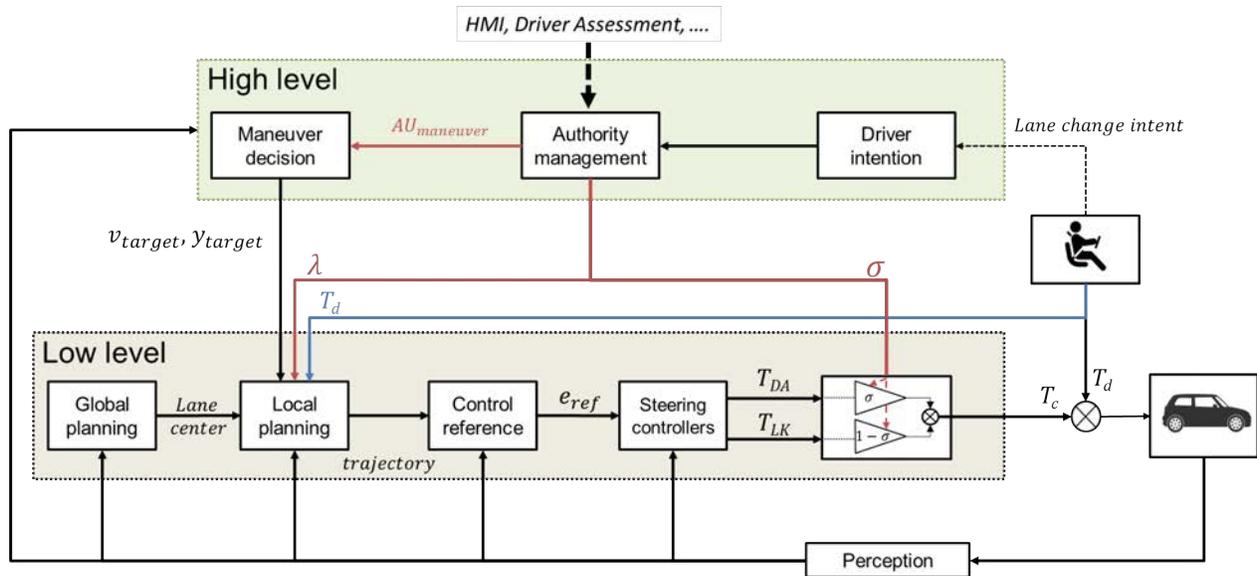


FIGURE 3.1 – Architecture de contrôle simplifiée : Fonctions de haut niveau pour la coopération Homme-machine (cadre vert)

3.2 Gestion de l'autorité

3.2.1 Introduction

Les notions de gestion de l'autorité et d'allocation des tâches sont centrales à la coopération entre le conducteur et le système. Ces dernières ont été discutées dans le chapitre 2. Y ont été introduites les nuances liées à l'autorité notamment avec le choix du niveau d'automatisation ce qui revient à l'allocation dynamique des tâches mais aussi, suivant les concepts du contrôle partagé, l'affinement de la répartition de l'autorité sur plusieurs niveaux de la tâche de conduite au sein d'un même mode de fonctionnement.

D'une part, le choix du niveau d'automatisation correspond à la répartition entre le conducteur et le système des sous-tâches de la conduite. Ceci définit a priori l'autorité entre le conducteur et l'automate sur chacune des sous-tâches. Cette distribution d'autorité est valable dans le cadre d'un fonctionnement nominal du système où le conducteur n'agit que sur la sous-tâche dont il est responsable. Par exemple, en niveau 1, lorsque le conducteur ne contrôle que le mouvement latéral et n'agit pas sur le contrôle longitudinal qui est sous l'autorité du système. Ou encore, dans le cas où le conducteur exerce, en niveau 2, son rôle de superviseur de la conduite sans agir sur les commandes du véhicule. D'autre part, l'autorité a priori définie dans un même mode de fonctionnement, peut être localement modifiée et ajustée dynamiquement afin de gérer l'intervention du conducteur sur une tâche initialement attribuée au système. Ceci dans le but de gérer les interférences négatives entre les deux

agents et de proposer un spectre d'assistance continu qui n'implique pas la désactivation de l'assistance à chaque intervention du conducteur. Cette modification locale de l'autorité est propre au mode de fonctionnement. En niveau 1 (le système gère le contrôle longitudinal seulement), si le conducteur agit sur la pédale d'accélération il pourra reprendre l'autorité et contrôler la vitesse du véhicule dans une certaine marge de sécurité (« over-ride »). Au-delà de cette marge, le système reprend l'autorité et applique une force sur la pédale active pour appliquer un point dur. Ce n'est qu'en dépassant ce point dur que le conducteur désactive le système. Le système est également désactivé si le conducteur « over-ride » le système pendant un long moment. En niveau 2 (le système agit sur le contrôle longitudinal et latéral), lorsque le conducteur exerce uniquement son rôle de superviseur, le système a l'autorité sur le contrôle latéral et longitudinal. Lors de l'intervention du conducteur sur le contrôle longitudinal du véhicule, l'autorité est gérée de la même manière qu'en niveau 1. Par ailleurs, l'intervention du conducteur sur le volant peut être analysée afin de distinguer les différents niveaux de la tâche de conduite. En effet, les interférences entre le conducteur et le système au niveau du volant peuvent être attribuées soit à un conflit au niveau du contrôle, i.e. le niveau opérationnel, soit au niveau de la décision, autrement appelé niveau tactique. Au niveau opérationnel, qui correspond au guidage du véhicule dans sa trajectoire, des interférences négatives peuvent apparaître lorsque le système tente de garder le véhicule au centre de la voie tandis que le conducteur préfère s'en écarter. Par ailleurs, les interférences négatives entre les deux agents peuvent traduire un conflit au niveau tactique où l'un d'eux veut rester sur la voie actuelle alors que l'autre a comme objectif de changer de voie par exemple.

Dans cette section nous détaillons le module *Authority Management* de l'architecture du système (se référer aux figures 2.7 et 3.1) dont le rôle est d'assurer la gestion de l'autorité selon ces deux aspects.

3.2.2 Sélection du mode de fonctionnement du système

Cette thèse étant réalisée dans le cadre du projet ANR CoCoVeA nous limitons notre étude au niveau 2 sur l'échelle de l'OICA. Le fonctionnement du système a donc été modélisé sous forme d'une machine à états finis (FSM) qui caractérise ses différents états et les transitions entre les modes de fonctionnement. Le graphe d'état de la Figure 3.3 présente les trois modes de fonctionnement principaux qui correspondent aux niveaux d'automatisation selon la définition de l'OICA :

- **Niveau 0** : Pas d'automatisation i.e. conduite « manuelle » ; seule l'aide de systèmes d'alerte tels que le LDW (Lane Departure Warning) ou le BSD (Blind Spot Detection) est disponible. Les alertes peuvent également être causées par la distraction ou la somnolence du conducteur.

- **Niveau 1** : L'automatisation à ce niveau ne concerne que le contrôle longitudinal. Le système fonctionne comme un ACC évolué qui fournit un retour haptique à la fois au niveau de la pédale d'accélérateur et au niveau du volant afin d'éviter les départs de voie involontaires.
- **Niveau 2** : Le système assure un contrôle total du véhicule. Toutefois, le conducteur reste responsable de la supervision de la tâche de conduite et doit être prêt à reprendre le contrôle dans les plus brefs délais. Le contrôle latéral est partagé avec le conducteur lorsqu'il agit sur le volant.

Un mode d'arrêt d'urgence a été également prévu pour implémenter différentes procédures de mise en sécurité du conducteur notamment avec la possibilité d'effectuer un arrêt sur voie ou un arrêt sur la bande d'arrêt d'urgence.

Ces principaux modes de fonctionnement regroupent un certain nombre de sous modes permettant de préparer des transitions sécurisées d'un mode à l'autre ainsi que des procédures de réveil afin de remettre le conducteur dans la boucle si nécessaire. D'une manière générale, ce graphe décrit l'ensemble des fonctionnalités disponibles (niveaux d'automatisation) et les modalités de passage d'un niveau à l'autre en fonction des situations rencontrées (domaine de fonctionnement), de l'état (distraction et/ou vigilance) et des actions du conducteur. Les transitions entre les différents modes du système prennent en compte diverses informations :

- l'état de fonctionnement des différents capteurs ;
- le contexte de la conduite ;
- les requêtes du conducteur sur l'IHM, pour sélectionner un niveau particulier (selon sa disponibilité) ;
- les actions du conducteur sur les organes de commande du véhicule (par exemple : action de freinage pour revenir en mode manuel) ;
- l'état physiologique du conducteur.

Les détails du graphe d'état du système ainsi que la définition des différentes variables impliquées dans les transitions sont disponibles dans [170] [171].

Ce dernier a été implémenté à l'aide de l'outil Stateflow disponible dans Matlab/Simulink pour fonctionner en temps réel avec l'ensemble des composants du système développé, dans le but de tester et de valider le fonctionnement global.

3.2.3 Gestion de l'autorité sur les différents niveaux de la tâche de conduite

Au long du présent manuscrit nous exposons les modules principaux de l'architecture proposée (Prise de décision, planification de trajectoire et contrôleurs). Outre la capacité de conduite hautement automatisée que ces modules procurent au système, un accent particulier

a été mis sur l'éventualité de voir un conflit apparaître sur les différents niveaux de la tâche de conduite. Ainsi, nous avons mis en place au sein de la structure de chacun de ces modules des mécanismes permettant de tenir compte d'informations qui caractérisent l'autorité du conducteur. Cette dernière résulte de l'arbitrage entre le système et le conducteur autrement appelé gestion de l'autorité. L'autorité peut être répartie sur chaque niveau de la conduite et permet au système de savoir quand adapter sa manoeuvre, sa trajectoire planifiée et ses actions de contrôle au profit de l'action du conducteur particulièrement dans le cas de conflits.

En posant un certain nombre de principes nous déduisons des règles permettant de gérer l'autorité à chaque niveau de la conduite (manoeuvre, trajectoire et action) :

- “Le conducteur doit avoir la maîtrise de son véhicule en toutes circonstances” (13ème article de la convention de Vienne)
- Un conducteur inattentif est susceptible d'être inconscient de la situation
- Les manoeuvres du système doivent respecter le code de la route
- Le système ne valide pas les manoeuvres qu'il estime dangereuses

Ces mécanismes de gestion de l'autorité sont exposés sur la figure 3.2. Ce processus doit tenir compte de la situation de conduite, des actions et intentions du conducteur mais aussi de sa capacité à gérer la situation. Cette dernière est estimée grâce aux informations issues du système de supervision du conducteur et du capteur de main sur le volant.

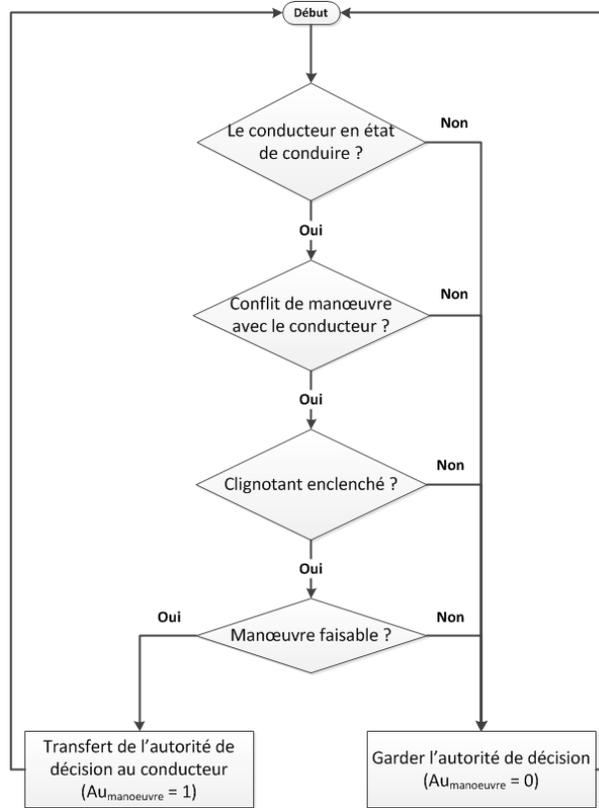
En résultat de la gestion de l'autorité, des variables binaires de décision ($AU_{manoeuvre}$, AU_{traj} et AU_{action}) déterminent si le conducteur a le droit ou pas d'agir à un niveau donné de la tâche de conduite. En d'autres termes, elles permettent au système de savoir s'il devrait maintenir ou adapter sa manoeuvre/trajectoire/action initialement préconisée. Par exemple si la variable $AU_{manoeuvre}$ est vraie alors le système met à jour son plan tactique et replanifie une trajectoire permettant d'effectuer la manoeuvre correspondant à l'intention du conducteur, sinon le système maintient sa manoeuvre actuelle.

Ces variables sont par la suite exploitées en adéquation avec les spécificités de chaque niveau. Par conséquent, lors de la décision sur la manoeuvre, le système valide la manoeuvre du conducteur si ce dernier détient l'autorité à ce niveau i.e si la variable binaire $AU_{manoeuvre}$ est vraie.

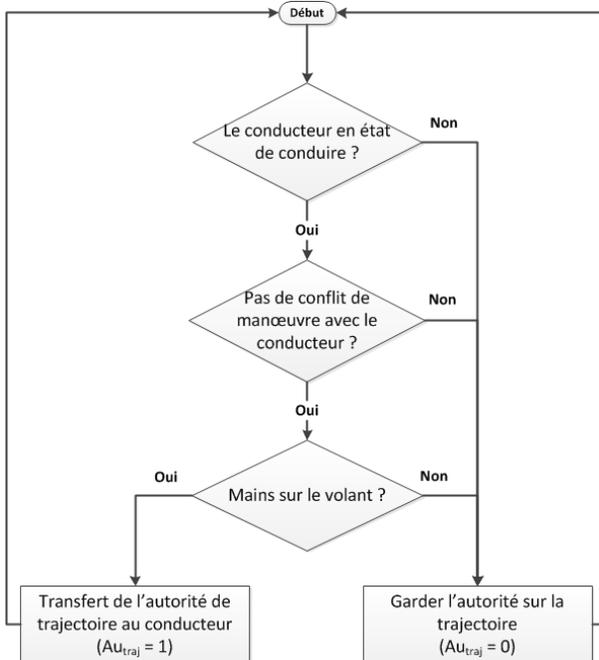
En ce qui concerne la trajectoire, la variable λ dans l'équation 4.17 et 3.1 (voir §4.2) peut être choisie comme suit afin de tenir compte de l'autorité du conducteur à modifier la trajectoire du système :

$$\lambda = AU_{traj}(1 - e^{-\epsilon|T_d|}) \quad (3.1)$$

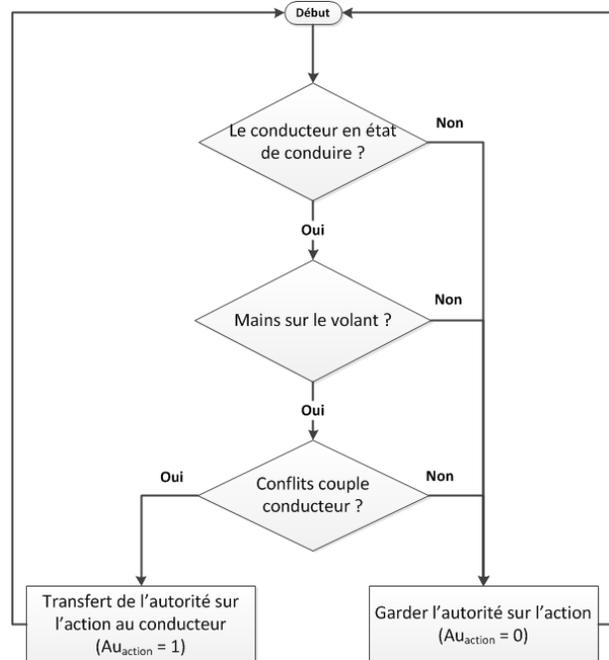
Toutefois, ce cas est particulier car, même si le conducteur détenait l'autorité à ce niveau, l'algorithme de vérification de collision intégré dans la planification de trajectoire rejeterait



(a) Gestion de l'autorité de décision sur la manœuvre



(b) Gestion de l'autorité sur la trajectoire



(c) Gestion de l'autorité de l'action

FIGURE 3.2 – Algorithmes de gestion de l'autorité sur les différents niveaux de la conduite abordés-

les trajectoires menant vers des collisions. Par conséquent, qu'importe le degré d'autorité attribué au conducteur, il ne pourra pas forcer le système à planifier des trajectoires qui ne respectent pas la dynamique du véhicule ou qui conduisent à une collision (les détails de la coopération au niveau de la trajectoire sont donnés dans la section 4.2).

Enfin, au niveau du contrôle latéral, la variable σ (fig. 3.1) est issue d'un filtrage de la variable binaire AU_{action} avec un filtre passe bas du premier ordre comme l'illustre l'équation (3.2).

$$\sigma(s) = AU_{action}(s) \cdot \frac{1}{1 + \tau_d s} \quad (3.2)$$

La constante de temps (τ_d) du filtre permet de déterminer la vitesse avec laquelle l'autorité au niveau opérationnel est transférée entre le conducteur et le système et vice-versa (Les détails sont donnés dans la section 4.3).

Ceci donne lieu à une coopération continue entre le conducteur et le système, coopération qui ne se limite pas à de la simple délégation comme c'est souvent le cas. Au lieu de se désengager lorsque le conducteur intervient, comme dans le cas de la délégation pure, le système offre une interaction plus riche en lui transmettant des informations telles que la validité de ses manœuvres et le risque encouru. Le système peut «dissuader» le conducteur de les réaliser quand celles-ci sont inadéquates ou bien adapter ses actions à celle du conducteur, en l'assistant ou en réduisant son intrusion.

3.2.4 La supervision du conducteur

L'inattention du conducteur est une cause majeure d'accidents (environ 25% des collisions déclarées par la police impliquent l'inattention [172]). Par conséquent, il y a un besoin évident d'évaluer l'état du conducteur afin d'atténuer les conséquences de l'inattention. Cela n'est pas uniquement valable pour une conduite classique sans automatisation. En fait, dans les niveaux 1 et 2 d'automatisation, même s'il est libéré de la tâche de contrôle, le conducteur conserve un rôle central dans la conduite puisqu'il doit superviser en permanence le système au cas où il devrait reprendre le contrôle du véhicule. La sécurité que l'automatisation est censée offrir pourrait être compromise car celle-ci peut favoriser la distraction du conducteur et le désengagement de la tâche de conduite [138], d'où l'importance de la détection d'inattention du conducteur.

Dans [173], un système d'assistance au maintien de voie basé sur la distraction a été présenté. Les auteurs ont soutenu que les informations de distraction du conducteur fournies par un système de surveillance de la conduite seraient utiles afin de réduire le taux de faux positifs et les nuisances que cela provoque pour les systèmes d'assistance au maintien de voie. En d'autres termes, si le conducteur est détecté comme supervisant la tâche de conduite, les

départs de voie sont plus susceptibles d'être intentionnels et l'intervention du système est inutile.

Suivant une idée similaire, un conducteur supervisant la scène de conduite est plus susceptible d'être conscient de la situation et devrait avoir l'autorité sur la tâche de guidage. Cependant, s'il est détecté comme étant distrait ou s'il manifeste un faible niveau de vigilance, le système devrait prendre le relais. Les informations de l'état du conducteur peuvent ainsi être utilisées dans le système afin d'adapter l'assistance. Lorsque le conducteur se montre distrait ou lorsqu'il est fatigué, sa conscience de la situation et ses performances de conduite sont susceptibles de baisser et le système pourrait ainsi renforcer son autorité relativement à celle du conducteur dont les facultés sont amoindries afin de garantir sa sécurité.

L'état du conducteur est lié à deux principaux facteurs : la distraction et la fatigue, et chacun d'entre eux se présente sous plusieurs formes. De nombreuses méthodes d'évaluation de l'état du conducteur existent (se reporter à [172] pour une revue bibliographique).

Dans notre cas, les informations sur l'état du conducteur sont fournies par un système de surveillance du conducteur qui repose sur la supervision en temps réel de deux paramètres indépendants : (1) le niveau de fatigue (sommolence) obtenu par l'analyse des paupières du conducteur et de la dynamique de clignement des yeux ; et (2) l'attention visuelle déduite de la position et de l'orientation de la tête.

Les données brutes fournies par le système de surveillance du conducteur sont traitées afin de fusionner les informations de fatigue et de distraction visuelle en une seule variable caractérisant l'état du conducteur (Driver State : DS). Pour la distraction, la variable binaire OFR (pour : OFF Road) prend comme valeur 1 quand le conducteur ne regarde pas la route devant et 0 dans le cas contraire. Une autre variable binaire DR (pour : DRowsy) prend pour valeur 1 lorsque le niveau de fatigue est critique et sinon 0. DS est calculé par 3.3 (Fig. 3.4).

$$DS = e^{-\frac{DR}{\epsilon}} \cdot [1 - (1 + e^{(-\alpha \cdot OFR \cdot T + \beta)})^{-1}] \quad (3.3)$$

Où : ϵ est un facteur d'échelle, T est la durée de distraction visuelle, α et β sont des paramètres pour modéliser la distraction visuelle qui permettent d'ajuster la dynamique de la variable DS . Lorsque l'état du conducteur est normal, DS vaut 1 et diminue vers 0 en suivant la dégradation de l'état du conducteur. Comme le montre la figure 3.4, DS tend progressivement vers 0 en cas de distraction, et revient instantanément à 1 lorsque le conducteur revient à la surveillance de la route comme décrit dans [173]. DS suit instantanément DR à 0 lorsque le niveau de fatigue est critique.

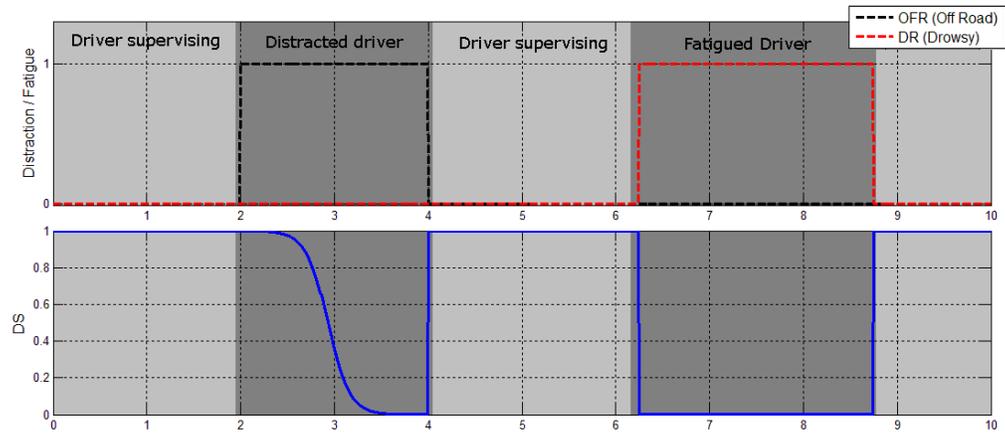


FIGURE 3.4 – La variable DS ($\alpha = 8.5$; $\beta = 8$; $\epsilon = 0.1$)

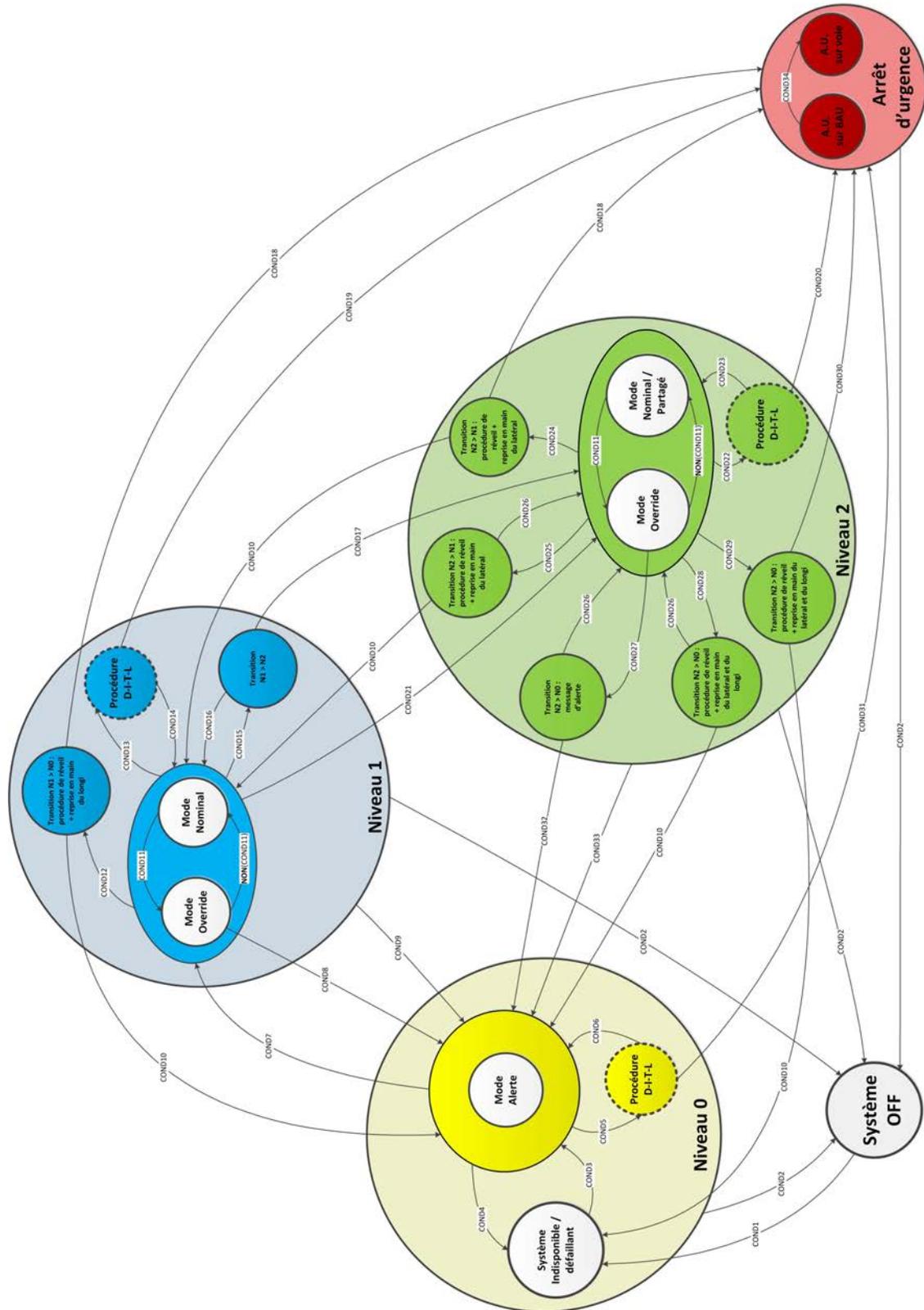


FIGURE 3.3 – Graphe de fonctionnement du système

3.3 Détection de l'intention d'un changement de voie

3.3.1 Introduction

Connaître l'intention du conducteur et celle des véhicules de trafic environnants est essentiel lorsqu'il s'agit d'enclencher l'intervention de systèmes d'aide comme le *LCA* pour prévenir un changement de voie dangereux ou afin que l'*ACC* anticipe l'insertion d'un véhicule devant. D'une manière générale, afin que la coopération avec le conducteur puisse être possible au niveau tactique le système doit être capable de reconnaître ses intentions si ce dernier ne les exprime pas explicitement à travers une IHM.

3.3.2 État de l'art

La détection de l'intention a été abordée sous deux angles : D'une part, la prédiction de la manœuvre avant même qu'elle ne soit initiée et d'autre part la reconnaissance de la manœuvre une fois que le conducteur l'a entamée.

La problématique de la prédiction d'intention du conducteur rejoint souvent la problématique de la prédiction du mouvement [174]. En effet, certaines approches pour prédire la trajectoire du véhicule considèrent que le mouvement futur d'un véhicule dépendrait du comportement ou de la manœuvre que le conducteur a l'intention d'effectuer et qu'il faudrait prédire à son tour. Plusieurs travaux existent sur ce sujet. En se basant sur le fait qu'il y'ait une phase de préparation avant d'initier la manœuvre, les données sur l'ego-véhicule (angle au volant, position de la pédale, vitesses et accélérations etc...), l'environnement (le positionnement sur la route et les informations sur les véhicules de trafic) et idéalement sur le conducteur (posture, direction du regard, position des mains . . .) sont analysées pour permettre une prédiction allant jusqu'à 2 secondes avant l'initiation de la manoeuvre [175]. Les techniques usuellement employées dans cette application sont des techniques d'apprentissage et de classification permettant de traiter des signaux temporels telles que les «Support Vector Machines » SVM [176], chaînes cachées de Markov HMM [177][178] et ses variantes [179], les réseaux bayésiens [180], les réseaux de neurones [181] etc... La plupart de ces techniques reposent sur de grandes bases de données pour l'apprentissage ce qui requiert de longues périodes d'acquisition de données et cela afin de garantir la robustesse des résultats et la généralisabilité pour d'autres conducteurs [182]. Un autre inconvénient réside dans la complexité des calculs qui n'est pas toujours adaptée à des applications en temps réel [183].

Les manoeuvres étudiées sont issues d'une décomposition des opérations permettant l'accomplissement des objectifs au niveau tactique. Cette décomposition change d'une étude à une autre et selon le contexte routier considéré. La prédiction des intentions dans les intersections a été le sujet de nombreuses études. L'objectif était d'anticiper les manoeuvres

de "tourner à gauche" ou "à droite" ou "de continuer tout droit" [179][184]. D'autres études ont ciblé des manoeuvres plus générales telles que l'action de freinage [185] [186] et l'arrêt [187]. Par ailleurs, un des contextes les plus étudiés reste celui de la conduite sur autoroute. Les manoeuvres qui nous intéressent dans le cas d'usage considéré sont principalement les changements de voie ainsi que le maintien de voie. Le problème est généralement formulé de la manière suivante : « La conduite se faisant sur autoroute, déterminer si le conducteur essaye de rester sur sa voie ou s'il veut changer de voie » [183].

Il faut savoir que plus la prédiction est en avance sur l'exécution de la manoeuvre et plus le risque d'une fausse détection augmente notamment lors de situations ambiguës ou il est difficile de déterminer une intention qui sera planifiée et ensuite annulée. De plus, ces approches se basent souvent sur des signaux qui ne sont disponibles que pour l'ego-véhicule comme l'angle au volant et des informations sur le conducteur, notamment la posture et la direction du regard, sans lesquelles la prédiction perdrait beaucoup de précision [184].

Le deuxième volet des travaux que nous évoquerons concerne ceux qui se penchent sur la reconnaissance de manoeuvres après leur initiation. Pour ce faire, on se base sur le changement de comportement lors de l'exécution d'une manoeuvre. L'objectif étant de reconnaître la manoeuvre le plus tôt possible afin d'exploiter cette information pour assister le conducteur. Pour détecter un changement de voie, les auteurs dans [188][150] se basent sur le temps de franchissement du marquage au sol (TLC : Time To Line Crossing) qu'ils estiment à partir de la position actuelle du véhicule sur la voie et sa trajectoire prédite. L'intention de changement de voie est alors déduite quand le TLC diminue et devient inférieur à un certain seuil fixé expérimentalement.

Salvucci [189][190] a proposé un concept intéressant appelé "*Mind-Tracking*". Il utilise des simulations parallèles de plusieurs modèles de conducteur qui prédisent son comportement si ce dernier effectuait différentes manoeuvres : maintien de voie, changement de voie vers la droite et changement de voie vers la gauche. La séquence d'actions de contrôle réalisées par le conducteur est comparée à celles prédites par les différents modèles afin d'inférer son intention. Cette dernière correspondra à la manoeuvre dont le modèle offre la séquence la plus proche.

Dans [191] les auteurs proposent une méthode de prédiction de la trajectoire en tenant compte de la manoeuvre du conducteur. A cette fin, une métrique qui estime la similarité entre la trajectoire suivie par le véhicule et celle des centres des autres voies est exploitée dans un algorithme qui permet de déterminer l'intention du conducteur de changer de voie ou de rester sur la voie actuelle.

Une limitation de ces travaux réside dans le fait qu'ils ne considèrent pas les interactions entre les véhicules or ces interactions ont une influence majeure sur les décisions du

conducteur et les manoeuvres qu'il choisit. A cet effet, les auteurs dans [192] ont souligné le fait que le pouvoir discriminant des indicateurs utilisés pouvait avoir plus d'importance que le type d'algorithme employé. Ils ont par ailleurs montré l'intérêt d'utiliser les informations sur le trafic avoisinant afin d'identifier l'intention du conducteur à changer de voie en s'affranchissant même des informations issues de systèmes de supervision du conducteur.

Dans un but de réduire la complexité des calculs et d'enlever le besoin d'une grande base de donnée d'apprentissage, une formulation du problème de reconnaissance de la manoeuvre du conducteur sous forme d'un système de règles logiques a été proposée dans [183]. Ce travail a montré qu'il était possible d'obtenir une bonne précision de détection des changements de voie en implémentant des règles compréhensibles à partir du moment où l'on utilise les informations pertinentes sur le mouvement latéral et longitudinal de l'ego véhicule et sur les véhicules de trafic avec lesquels il évolue. De plus, le fait d'utiliser des informations qui seraient disponibles pour les autres véhicules permettrait également de déduire les intentions des véhicules de trafic avec la même méthode. Par conséquent, cette méthode permet de retranscrire d'une manière naturelle le comportement du conducteur en milieu autoroutier, environnement structuré et régi par des règles de circulation assez simples. Par ailleurs, outre le mérite qu'a cette approche d'être facilement implémentable, elle est également flexible et facilement extensible. Pour ces raisons, ce travail a été pris comme point de départ afin de construire le module de détection d'intention du conducteur. Dans ce qui suit nous exposerons les règles de base permettant de détecter un changement de voie.

3.3.3 Règles permettant de reconnaître les manoeuvres du conducteur

Au fur et à mesure qu'un conducteur évolue sur autoroute, il doit déterminer s'il doit rester dans la voie actuelle ou changer de voie vers la gauche ou vers la droite. Selon la manoeuvre choisie, il adaptera son comportement de conduite aux véhicules environnants. En effet, s'il entend rester dans la voie actuelle, il doit adapter la vitesse du véhicule à celle du véhicule précédent et maintenir le positionnement latéral du véhicule pour ne pas quitter la voie. S'il décide de changer de voie à gauche ou à droite, il devra adapter sa vitesse pour s'accommoder des vitesses des véhicules dans la voie cible tout en exécutant un déplacement latéral vers cette dernière. Par conséquent, la manoeuvre que le conducteur a l'intention de réaliser peut être reconnue en observant des indicateurs sur le mouvement latéral et longitudinal du véhicule.

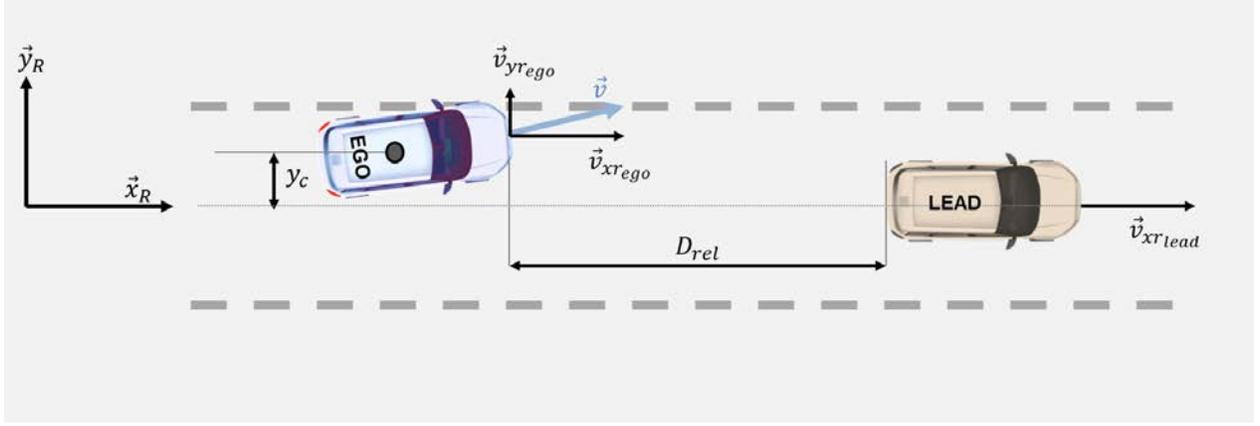


FIGURE 3.5 – Représentation de l'environnement pour la détection d'intention

Les critères liés au mouvement latéral indiquant un changement de voie vers la gauche sont :

$$CVG_{vy} = (v_{yr_{ego}} \geq \alpha_{th}) \quad (3.4)$$

$$CVG_{yc} = (y_c \geq \beta_{th}) \quad (3.5)$$

Avec CVG_{vy} et CVG_{yc} respectivement l'indicateur de la vitesse latérale dans le repère lié à la route v_{yr} et l'indicateur lié à l'écart latéral par rapport au centre de la voie y_c (se référer à la figure 3.5).

Lorsqu'on arrive sur un véhicule lent à dépasser, des indicateurs qui reflètent le rapprochement du véhicule de devant peuvent être exploités afin d'inférer l'intention de dépassement. Par conséquent, les critères relatifs au mouvement longitudinal sont :

$$CVG_{ax} = (a_{xr} \geq \kappa_{th}) \quad (3.6)$$

$$CVG_{vx} = (v_{x_{rel}} \leq \gamma_{th}) \quad (3.7)$$

$$CVG_{TTCx} = (TTC \leq \zeta_{th}) \quad (3.8)$$

$$CVG_{TIVx} = (TIV \leq \xi_{th}) \quad (3.9)$$

$a_{xr_{ego}}$ représente l'accélération longitudinale de l'ego-véhicule et $v_{x_{rel}}$ la vitesse relative avec le véhicule leader ($v_{x_{rel}} = v_{xr_{lead}} - v_{xr_{ego}}$).

Le TTC (Time To Collision) et le TIV (Temps inter-véhiculaire) sont des métriques temporelles estimant le risque de collision frontale [193]. Ils sont calculés à partir de la distance

relative entre l'ego-véhicule et le véhicule prédécesseur D_{rel} , et leurs vitesses respectives comme le montrent les équations suivantes :

$$\begin{aligned} TTC &= \frac{D_{rel}}{v_{xrego} - v_{xrlead}}, \quad v_{xrego} > v_{xrlead} \\ TIV &= \frac{D_{rel}}{v_{xrego}} \\ D_{rel} &= x_{rlead} - x_{rego} \end{aligned}$$

CVG_x (eq (3.10)) est la condition qui agrège l'ensemble des indicateurs longitudinaux d'un changement de voie vers la gauche.

$$CVG_x = CVG_{TTCx} \vee (CVG_{ax} \wedge (CVG_{vx} \vee CVG_{TIVx})) \quad (3.10)$$

Les symboles \wedge et \vee représentent respectivement les opérateurs logiques *ET* et *OU*. Enfin la condition de changement de voie vers la gauche CVG est donnée dans l'eq (3.11).

$$CVG = (CVG_{vy} \wedge CVG_{yc}) \vee (CVG_x \wedge (CVG_{vy} \vee CVG_{yc})) \quad (3.11)$$

Selon le code de la route, les véhicule devraient rouler sur la voie de droite tant que c'est possible. La règle *CVD* pour détecter l'intention du changement de voie vers la droite et les deux indicateurs correspondants au mouvement latéral sont données ci-dessous :

$$CVD_{vy} = (v_{yrego} \leq -\alpha_{th}) \quad (3.12)$$

$$CVD_{yc} = (y_c \leq -\beta_{th}) \quad (3.13)$$

En partant du principe que les règles de circulation interdisent le dépassement par la droite les indicateurs liés au rapprochement du véhicule de devant ne sont pas considérés.

$$CVD = (CVD_{vy} \wedge CVD_{yc}) \quad (3.14)$$

Il est intéressant de souligner que l'ensemble des études sur la détection d'intention sont faites dans le contexte de la conduite manuelle. Toutefois, dans le cas d'un véhicule automatisé où la conduite est effectuée avec la présence permanente d'un système qui partage le contrôle, et qui a la possibilité de prendre des décisions et de les implémenter, les interférences entre le conducteur et le système peuvent être interprétées comme une divergence sur le plan tactique. Cette information peut être utilisée afin de reconnaître les intentions du conducteur. Pour

cela, nous avons ajouté deux règles pour en tenir compte.

$$CVG_{conflit} = (|T_d - T_c| \geq \lambda_{th}) \wedge (T_d \geq \lambda_{th_d}) \quad (3.15)$$

$$CVD_{conflit} = (|T_d - T_c| \geq \lambda_{th}) \wedge (T_d \leq -\lambda_{th_d}) \quad (3.16)$$

$CVG_{conflit}$ et $CVD_{conflit}$ représentent les indicateurs liés au conflit au niveau du volant qui correspondent respectivement au changement de voie gauche et droit. T_d et T_c sont respectivement le couple de braquage du conducteur et celui du contrôleur latéral du système.

Les conditions du changement de voie vers la gauche et du changement de voie vers la droite exprimées dans eq (3.11) et eq (3.14) respectivement deviennent :

$$CVG' = CVG \vee CVG_{conflit} \quad (3.17)$$

$$CVD' = CVD \vee CVD_{conflit} \quad (3.18)$$

Pour finir, lorsque aucune des deux conditions de changement de voie n'est remplie on conclut que le conducteur veille au maintien du véhicule dans la voie. La condition correspondante est la suivante :

$$CMV = (\overline{CVG'} \wedge \overline{CVD'}) \quad (3.19)$$

α_{th} , β_{th} , κ_{th} , γ_{th} , ζ_{th} , λ_{th} , λ_{th_d} et ξ_{th} sont des paramètres de réglage de l'algorithme représentant différents seuils.

Afin d'évaluer l'ensemble de ces règles et l'intérêt des règles rajoutées pour la reconnaissance de l'intention nous avons enregistré deux jeux de données sur le simulateur de conduite SHERPA-LAMIIH. Ces enregistrements proviennent d'un scénario de conduite sur une route à deux voies et un seul sens de circulation avec diverses conditions de circulation. Les données sont enregistrées avec une fréquence de 100 Hz.

Une partie des données de test a été enregistrée pendant une phase de conduite manuelle. La deuxième partie a été enregistrée pendant une phase de conduite avec l'automatisation activée. Les enregistrements comprennent un total de 112 situations de changement de voie.

Afin d'évaluer l'algorithme de reconnaissance d'intention, il est nécessaire de bien définir la situation de changement de voie. Par conséquent, nous nous basons sur la définition donnée dans [190] où le changement de voie est marqué par le moment où le véhicule commence à se déporter vers une autre voie et continue sans contre-braquage jusqu'à l'atteindre.

Afin d'évaluer la performance de reconnaissance de l'intention, nous avons utilisé les

métriques suivantes :

- Le taux de détection (DR : Detection rate) qui est le rapport du nombre total de changements de voie détectés sur le nombre total de changements de voie réellement exécutés ;
- le retard de détection (TBD : Time Before Detection), qui est le temps écoulé entre le début de la manœuvre et sa détection ;
- le temps entre la détection et le franchissement de la ligne ($TDLC$: Time from Detection to Lane Crossing) ;
- et le déplacement latéral avant la détection ($LOBD$: Lateral Offset Before Detection) qui représente la distance latérale parcourue du début du changement de voie jusqu'à sa détection.

$\alpha_{th} = 0.35 \text{ m/s}$	$\beta_{th} = 3.5/3 \text{ m}$	$\kappa_{th} = 0 \text{ m/s}^2$	$\gamma_{th} = -2 \text{ m/s}$
$\zeta_{th} = 5 \text{ s}$	$\xi_{th} = 0.5 \text{ s}$	$\lambda_{th} = 3 \text{ N/m}$	$\lambda_{th_d} = 1 \text{ N/m}$

TABLE 3.1 – Paramètres de l'algorithme

Les paramètres des algorithmes obtenus expérimentalement pour ce test sont indiqués dans le tableau 3.1.

Les résultats pour la conduite manuelle sont rapportés dans le tableau 3.2. Ils montrent un taux de détection de 100 % pour les changements de voie vers la gauche et vers la droite.

Métrique	Changement de voie	
	<i>vers la gauche</i>	<i>vers la droite</i>
DR	100%	100%
TBD moyen	1.01 s	0.83 s
TDLC moyen	1.48 s	1.25 s
LOBD moyen	0.47 m	0.3 m

TABLE 3.2 – La performance de détection durant la phase de conduite manuelle

Les paramètres moyens TBD , $TDLC$ et $LOBD$ montrent que tous les changements de voie sont détectés avant de franchir la ligne. Étant donné le fait que pendant la phase de conduite manuelle il n'y a pas de couple d'assistance au volant, les règles sur les interférences entre couple conducteur et couple d'assistance ne sont pas pertinentes et de ce fait, les deux méthodes sont équivalentes.

Métrique	Algorithme	
	<i>Algo 1</i>	<i>Algo 2</i>
DR	100%	100%
TBD moyen	1.20 s	0.56 s
TDLC moyen	1.64 s	2.27 s
LOBD moyen	0.42 m	0.1 m

TABLE 3.3 – Comparatif de la performance de détection avec les deux algorithmes

Les résultats pour la conduite avec l’automatisation sont présentés dans le tableau 3.3. Pour cet ensemble de données, l’algorithme basé sur les règles (3.11) et (3.14) initialement présentées dans [183] qu’on appellera *Algo 1* est comparé avec *Algo 2*, l’algorithme basé sur les règles étendues (3.17) et (3.18) pour tenir compte des interférences au volant. Comme on peut le voir, l’introduction de signaux relatifs aux interférences des couples augmente considérablement les performances de détection, ce qui permet une détection plus rapide et laisse plus de temps à réagir. Il est important de préciser que l’augmentation des performances de détection dans le deuxième algorithme est apparue sans accroître les fausses détections positives.

Hormis les bonnes performances de l’algorithme basé sur les règles présenté précédemment, cette performance est limitée à la conduite sur une route dont la courbure est très faible. En effet, les seuils pour détecter les changements de voie sur ligne droite risquent de ne plus être valides lorsque la courbure augmente et les fausses détections pourraient se multiplier. En vue d’obtenir un algorithme de détection plus robuste et moins sensible aux données imprécises et dans le but d’obtenir une information continue qui suit en temps réel l’intention du conducteur nous avons utilisé les règles précédemment présentées afin de construire les règles d’inférence du module de détection de l’intention basé sur la logique floue. Ce dernier est présenté dans la section suivante.

3.3.4 Module de détection de l’intention du conducteur basé sur la logique floue

3.3.4.1 Introduction à la logique floue

La logique floue décrit une forme de raisonnement approximatif qui s’apparente à celui de l’humain. L’idée a émergé de la théorie de Lotfi Zadeh des ensembles flous présentée dans un article en 1964 [194]. Dans [195], le raisonnement approximatif ou le raisonnement flou est défini comme étant le processus par lequel une conclusion est déduite à partir d’un ensemble de prémisses imprécises. Zadeh a introduit le concept de variable linguistique, variable dont

les valeurs sont des mots et non des chiffres ce qui donne la possibilité de calculer avec des mots [196]. Cette technique représente un outil puissant qui a permis de contrôler des processus complexes voire non linéaires [197] sans disposer de modèles mathématiques complexes et sans une connaissance approfondie des équations les régissant. Tandis qu'avec les techniques de contrôle classiques c'est le système ou le processus à contrôler qui est modélisé, un contrôleur basé sur logique floue met l'accent sur la modélisation du comportement de l'opérateur humain.

La logique floue trouve tout son intérêt lorsqu'il y a une tolérance pour l'imprécision qui pourrait être exploitée pour obtenir plus de flexibilité, de robustesse, un coût réduit et un meilleur rapport à la réalité [196].

En 1974, Mamdani dans [198] a été le premier à démontrer avec un exemple pratique l'efficacité de cette technique. Il a démontré qu'avec un contrôleur très simple basé sur la logique floue il était possible de contrôler un moteur à vapeur. C'est au Japon que la logique floue a connu une période florissante où de nombreux développements ont été réalisés [199]. Le contrôle avec la logique floue a fait ses preuves sur le métro de Sendai, où cette technique a été employée pour régir tous les aspects d'accélération, de freinage et d'arrêt. Elle a été employée brillamment pour contrôler et manœuvrer un véhicule à l'aide d'instructions orales [200]. Nous citerons également son utilisation dans les domaines aéronautique [201] et ferroviaire [202]. En utilisant la logique floue, des travaux récents ont permis de formaliser simplement différents aspects du contrôle d'un véhicule notamment le contrôle longitudinal et la fonction ACC et Stop & Go [203] ainsi que le contrôle latéral pour le maintien de voie et les changements de voie [204]. Elle a été utilisée également pour détecter un risque de collision frontale et enclencher un système d'évitement d'obstacles [205]. Outre la commande, la logique floue a été utilisée dans diverses applications temps réel notamment pour la prise de décision [206], la fusion de données [207] [208] la reconnaissance de formes [209]. Un système temps-réel utilisant la logique floue pour la supervision de l'état de vigilance du conducteur a été proposé dans [210].

Principes et vue générale L'univers de discours d'une variable floue représente le domaine des valeurs admises pour cette dernière. L'univers de discours est partitionné en sous-ensembles pouvant se chevaucher qu'on appelle des sous-ensembles flous. A chaque sous-ensemble correspond une valeur linguistique qui donne une représentation approximative de la valeur réelle de la même manière qu'une personne voyant passer une voiture à 130km/h et sans même avoir la valeur exacte de sa vitesse pourrait la décrire comme une vitesse élevée. « Élevée » dans ce cas de figure est la valeur linguistique attribuée à la vitesse. Il est donc possible de choisir un nombre arbitraire de valeurs linguistiques et les sous-ensembles flous correspondant qui divisent l'espace de discours de chaque variable (par exemple rapide ou

lent) pendant que l'appartenance à chaque terme est représentée par une fonction d'appartenance particulière. Ceci correspond au partitionnement flou comme l'illustre la figure 3.6 pour la vitesse latérale v_y .

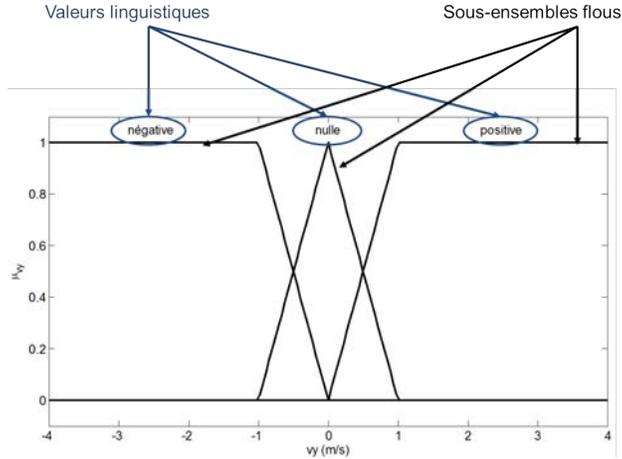


FIGURE 3.6 – Partitionnement d'une variable continue v_y

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes et permettent de définir un degré d'appartenance entre 0 et 1 pour chaque sous-ensemble flou.

On définira la fonction d'appartenance à un sous-ensemble flou A dans un univers de discours X comme la fonction $\mu_A(x)$ associant à chaque élément x de X une valeur dans l'intervalle des nombres réels $[0, 1]$.

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$$

Ainsi le sous-ensemble flou A dans X peut être représenté comme suit :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (3.20)$$

Parmi les formes les plus répandues pour définir les fonctions d'appartenance d'un sous ensemble flou on trouve les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes et sigmoïde. De façon similaire à l'algèbre classique, les opérations telles que l'égalité, l'inclusion, l'intersection, l'union et le complément sont également définies pour les ensembles flous.

Contrairement à la logique classique où une proposition d'appartenance à un ensemble n'admet que deux valeurs "vraie" ou "fausse", en logique floue elle peut être partiellement vraie et partiellement fausse à la fois.

Une proposition floue élémentaire est simplement exprimée comme suit :

$$p : V \text{ est VL}(A) \quad (3.21)$$

Avec V une variable qui prend sa valeur dans l'univers de discours X et $VL(A)$ la valeur linguistique correspondant au sous ensemble flou A . Le degré de vérité de la proposition p pour l'entrée $V = v$ est exprimé en fonction de la fonction d'appartenance μ_A du sous ensemble A comme suit :

$$V(p) = \mu_A(v) \quad (3.22)$$

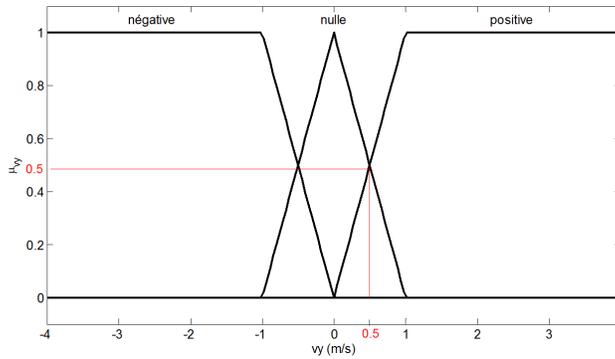


FIGURE 3.7 – Exemple d'une proposition floue et déduction du degré de vérité

Comme l'illustre l'exemple sur la figure 3.7, le degré de vérité de la proposition ($p : v_y$ est *positive*) pour une vitesse $v_y = 0.5$ a un degré de vérité $V(p) = \mu_{positive}(0.5) = 0.5$.

Une proposition floue peut être obtenue par la composition de propositions élémentaires. Elle peut être constituée de la conjonction de propositions floues élémentaires :

$$p : (V_1 \text{ est } A_1) \text{ et } \dots \text{ et } (V_n \text{ est } A_n)$$

Sa valeur de vérité est alors définie par :

$$V(p) = \min\{\mu_{A_1}(V_1), \dots, \mu_{A_n}(V_n)\} \quad (3.23)$$

D'autre part une proposition peut être constituée de la disjonction de plusieurs propositions élémentaires :

$$p : (V_1 \text{ est } A_1) \text{ ou } \dots \text{ ou } (V_n \text{ est } A_n)$$

Le degré de vérité de la proposition issue de la disjonction est donné par :

$$V(p) = \max\{\mu_{A_1}(V_1), \dots, \mu_{A_n}(V_n)\} \quad (3.24)$$

La base du raisonnement flou réside dans les règles floues. Ces dernières sont construites à partir de la composition de propositions élémentaires (p_1, \dots, p_n) appelées prémisses dont l'implication mène à la conclusion c qui est également une proposition floue de la forme « Y est VL(B) ».

Les règles s'expriment sous la forme :

$$R : \mathbf{Si} \ (p_1 \text{ conjonction } \dots p_n) \ \mathbf{alors} \ c \quad (3.25)$$

En mettant p la proposition floue issues de la composition des propositions élémentaires (p_1, \dots, p_n) la règle floue devient

$$R : \mathbf{Si} \ p \ \mathbf{alors} \ c$$

Équivalent à :

$$R : \mathbf{Si} \ (V \text{ est VL}(A)) \ \mathbf{alors} \ (Y \text{ est VL}(B)) \quad (3.26)$$

D'une manière générale, l'implication floue définit la liaison entre les prémisses et la conclusion. Elle permet de définir le degré de vérité de la règle floue et ainsi d'obtenir le degré d'appartenance de la conclusion. Ainsi, l'implication I définit la fonction d'appartenance $\mu_R(v, y)$ de la règle R pour tout (v, y) de $V \times Y$ à partir de la fonction d'appartenance $\mu_A(v)$ intervenant dans la prémisse p et $\mu_B(y)$ intervenant dans la conclusion de la règle :

$$I : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

$$\mu_R(v, y) = I(\mu_A(v), \mu_B(y)) \quad (3.27)$$

Il existe plusieurs fonctions pour l'implication floue. La fonction d'implication de Mamdani est parmi les plus usuellement utilisées. Elle est exprimée comme suit :

$$I_m = \min\{\mu_A(v), \mu_B(y)\} \quad (3.28)$$

Lors de la conception d'un système d'inférence flou, il est très rare de faire usage d'une seule règle d'inférence. En effet, le savoir expert qu'intègre un système flou se décline sous forme d'un ensemble de règles. Dans ce cas il est nécessaire de faire l'inférence sur plusieurs

règles. On dit d'une règle qu'elle est active à partir du moment où son degré de vérité est non nul. Par conséquent il est possible que plusieurs règles soient actives simultanément et conclure sur des conclusions de degrés de vérités différents et éventuellement contradictoires. A ce moment, le raisonnement sur plusieurs règles réside dans l'agrégation des conclusions et leur degré de vérité.

L'ensemble R_i de N_R règles définies pour une prémisse ayant N_P sous-ensembles flous et une conclusion répartie sur N_C sous-ensembles flous est représenté sous la forme :

$$R_i : \mathbf{Si} (V \text{ est VL}(A_{ij})) \mathbf{alors} (Y \text{ est VL}(B_{ik})) \quad (3.29)$$

avec : $i \in \{1, \dots, N_R\}, j \in \{1, \dots, N_P\}$ et $k \in \{1, \dots, N_C\}$

En retenant la méthode de Mamdani pour l'agrégation, la fonction d'appartenance de la conclusion finale après agrégation de l'ensemble de règles pour une valeur d'entrée $V = v_0$ est donnée par :

$$\mu_c(y) = \max_{i=1, N_R} (\mu_{R_i}(v_0, y)) \quad (3.30)$$

Comme l'illustre l'eq (3.30), à l'issue du processus de l'inférence floue nous obtenons une fonction d'appartenance. Le traitement qui permet de définir une correspondance entre ce résultat et la grandeur continue en sortie du système de raisonnement flou est appelé Défuzzification. Plusieurs méthodes de défuzzification existent. La méthode du centre de gravité est très utilisée avec le système d'inférence floue de Mamdani. Dans ce cas, la valeur continue en sortie correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface sous la fonction d'appartenance de la conclusion $\mu_c(y)$. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$y_{cg} = \frac{\int_y y \cdot \mu_c(y) dy}{\int_y \mu_c(y) dy} \quad (3.31)$$

Ainsi, lorsque les variables d'entrée et de sortie sont partitionnées et la base de règles établie, un système d'inférence flou est entièrement défini lorsqu'on choisit la méthode de la conjonction, de la disjonction, de l'implication, de l'agrégation et de la défuzzification.

Un exemple de l'inférence min-max de Mamdani est fourni dans la figure (3.8). Pour cet exemple deux règles sont définies :

$$R_1 : \mathbf{Si} (V_1 \text{ est VL}(A_{11})) \mathbf{et} (V_2 \text{ est VL}(A_{12})) \mathbf{alors} (Y \text{ est VL}(B_1))$$

$$R_2 : \mathbf{Si} (V_1 \text{ est VL}(A_{21})) \mathbf{et} (V_2 \text{ est VL}(A_{22})) \mathbf{alors} (Y \text{ est VL}(B_2))$$

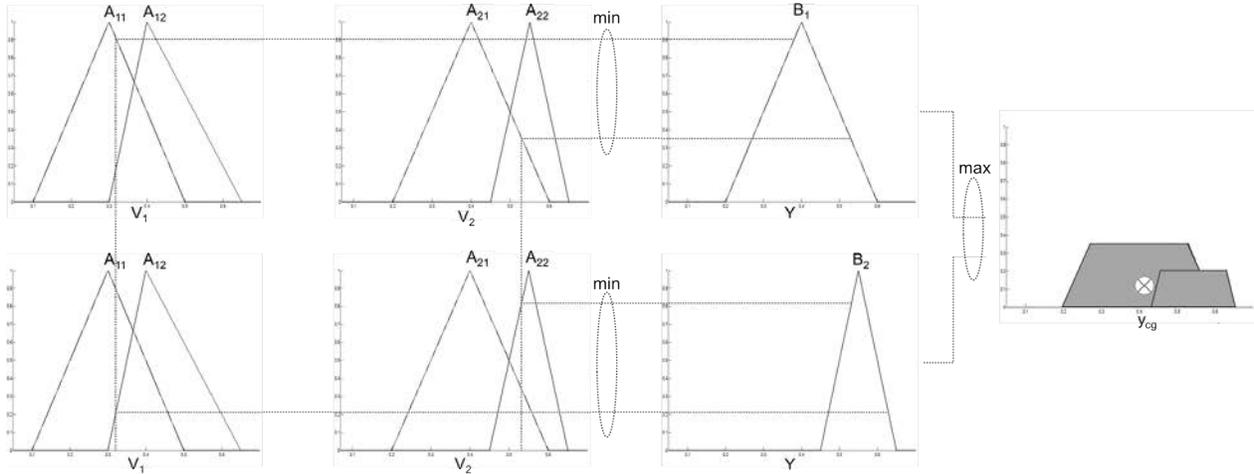


FIGURE 3.8 – Exemple d’une inférence sur deux règles floues

3.3.4.2 Architecture du module de détection d’intention

D’un point de vue fonctionnel, le processus de raisonnement flou peut être divisé en trois étapes : la fuzzification, l’inférence et la défuzzification. L’architecture du module de détection de l’intention est exposée dans la figure 3.9.

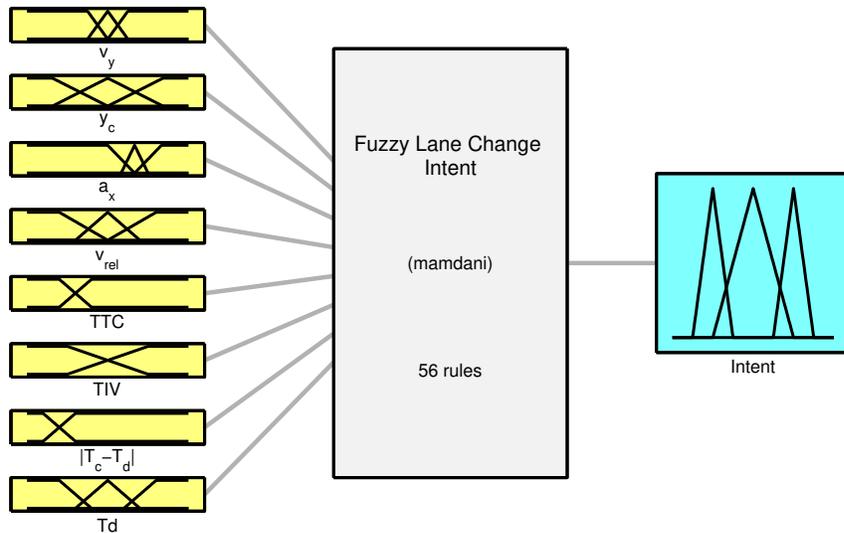


FIGURE 3.9 – Système de détection de l’intention basé sur la logique floue

Les variables en entrée du module sont les mêmes variables utilisées dans les règles exposées dans la section à savoir : v_{yr} , y_c , a_{xr} , v_{xrel} , TTC , TIV et les couples du conducteur et du

contrôleur T_d, T_c respectivement(3.3.3).

Le partitionnement des différents espaces de discours des variables d'entrée du système est fait à partir des paramètres du tableau 3.1. Les ensembles flous ont par la suite été affinés à l'aide de l'observation de données expérimentales issues du simulateur de conduite SHERPA. Nous avons fait le choix d'utiliser des fonctions d'appartenance trapézoïdales et triangulaires en raison de la rapidité de calculs qu'elles offrent. La figure 3.10 montre le partitionnement des différentes entrées du module de détection de l'intention.

Les valeurs linguistiques choisies pour les variables $v_{yr}, y_c, a_{xr}, v_{x_{rel}}$ et T_d admettent trois valeurs linguistiques : «*nul*» qui traduit une valeur qui est plutôt proche de zéro, «*neg*» pour des valeurs négatives et «*pos*» pour des valeurs positives. D'autre part, les entrées TTC, TIV et $|T_d - T_c|$ qui sont toujours positives prennent deux valeurs linguistiques : «*petit*» et «*grand*».

Quant à la variable de sortie elle représente la décision sur la manoeuvre détectée. Elle prend trois valeurs correspondant au nombre de manoeuvres étudiées comme l'illustre la figure 3.11 : Le changement de voie vers la gauche (LCL : Lane change to Left), le maintien de voie (LK : Lane Keeping) et le changement de voie vers la droite (LCR : Lane Change to Right).

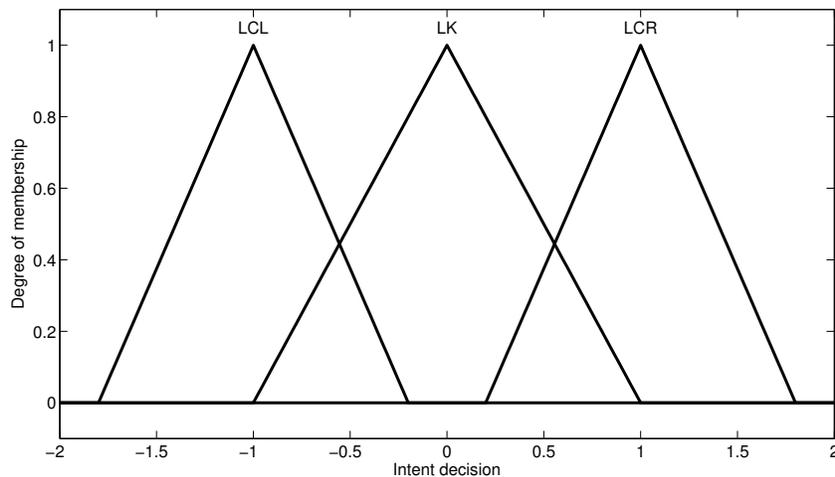
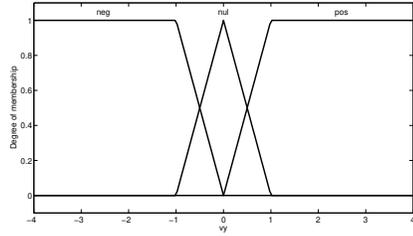
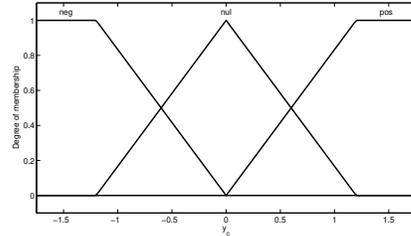


FIGURE 3.11 – Partitionnement de la sortie de décision sur l'intention du conducteur

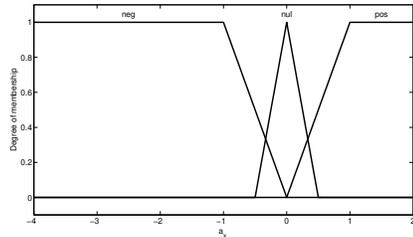
Pour son efficacité et sa simplicité nous avons implémenté le système d'inférence de Mamdani. Ce dernier utilise la méthode **min** pour la conjonction (eq. 3.23) ainsi que pour l'implication (eq. 3.28). La méthode **max** quant à elle a été retenue pour la disjonction (eq. 3.24) et l'agrégation des règles lors de l'inférence (eq. 3.30).



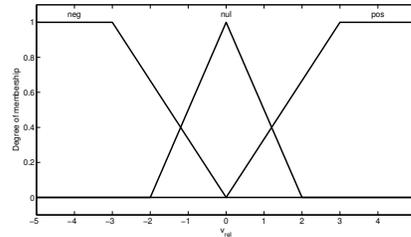
(a) Partitionnement de v_{yr}



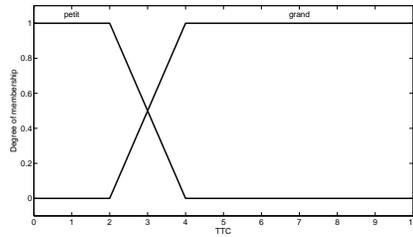
(b) Partitionnement de y_c



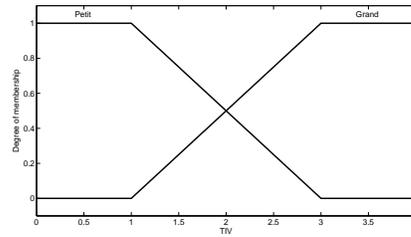
(c) Partitionnement de a_{xr}



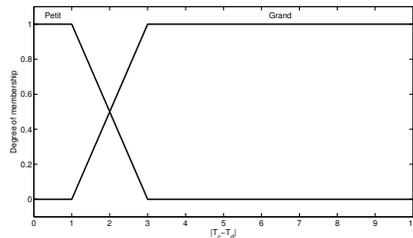
(d) Partitionnement de v_{xrel}



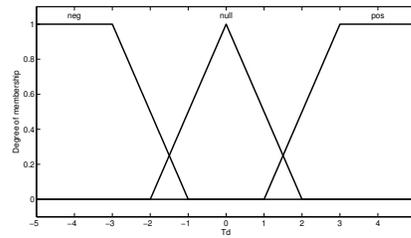
(e) Partitionnement de TTC



(f) Partitionnement de TIV



(g) Partitionnement de $|T_d - T_c|$



(h) Partitionnement de T_d

FIGURE 3.10 – Partitionnement des variables d'entrée du module de détection de l'intention

3.3.4.3 Construction de la base de règles d'inférence

La construction de la base de règles s'appuie sur les règles logiques précédemment introduites dans les équations (3.17, 3.18 et 3.19). L'idée a été de simplifier et de réécrire ces fonctions logiques sous forme de *somme de produits*, ou chaque terme représentera une règle d'inférence floue distincte. L'ensemble de ces règles sont agrégées pour constituer la base de règles liées à chaque variable de décision i.e l'intention de changer de voie à gauche, l'intention de changer de voie à droite et l'intention de rester sur la voie actuelle. Dans ce qui suit un exemple de cette démarche pour la condition de détection du changement de voie vers la gauche de l'équation 3.17. La simplification de l'équation 3.17 en fonction des propositions élémentaires exprimées dans (3.4 à 3.9, 3.12, 3.13, 3.15 et 3.16).

$$\begin{aligned}
 CVG = & CVG_{vy}.CVG_{yc} + CVG_{yc}.CVG_{TTCx} + CVG_{yc}.CVG_{ax}.CVG_{vx} \\
 & + CVG_{yc}.CVG_{ax}.CVG_{TIVx} + CVG_{vy}.CVG_{TTCx} + CVG_{conflit} \\
 & + CVG_{vy}.CVG_{ax}.CVG_{vx} + CVG_{vy}.CVG_{ax}.CVG_{TIVx}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

A partir de là nous tirons autant de règles floues que de termes dans l'expression 3.32. Le tableau 3.4 présente les règles floues liées à la décision LCL dans l'ordre des termes qui le composent.

R_1 :	$(v_{yr} \text{ est } pos) \text{ et } (y_c \text{ est } pos) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_2 :	$(y_c \text{ est } pos) \text{ et } (TTC \text{ est } petit) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_3 :	$(y_c \text{ est } pos) \text{ et } (a_{xr} \text{ est } pos) \text{ et } (v_{xrel} \text{ est } neg) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_4 :	$(y_c \text{ est } pos) \text{ et } (a_{xr} \text{ est } pos) \text{ et } (TIV \text{ est } petit) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_5 :	$(v_{yr} \text{ est } pos) \text{ et } (TTC \text{ est } petit) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_6 :	$(T_d - T_c \text{ est } grand) \text{ et } (T_d \text{ est } pos) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_7 :	$(v_{yr} \text{ est } pos) \text{ et } (a_{xr} \text{ est } pos) \text{ et } (v_{xrel} \text{ est } neg) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$
R_8 :	$(v_{yr} \text{ est } pos) \text{ et } (a_{xr} \text{ est } pos) \text{ et } (TIV \text{ est } petit) \text{ alors } (Intention \text{ est } LCL)$

TABLE 3.4 – Règles floues pour l'intention du changement de voie vers la gauche (valeur linguistique de la sortie LCL (voir §3.3.4.2))

La même démarche est employée pour les deux autres manoeuvres à savoir le maintien de voie (eq. 3.19) et le changement de voie vers la droite (eq. 3.18). Au total, 56 règles ont été générées.

3.3.4.4 Résultats expérimentaux

Afin de vérifier l'efficacité de l'algorithme de détection de l'intention proposé nous le testons sur une route dont la courbure varie cette fois. La figure 3.12 illustre les résultats

obtenus.

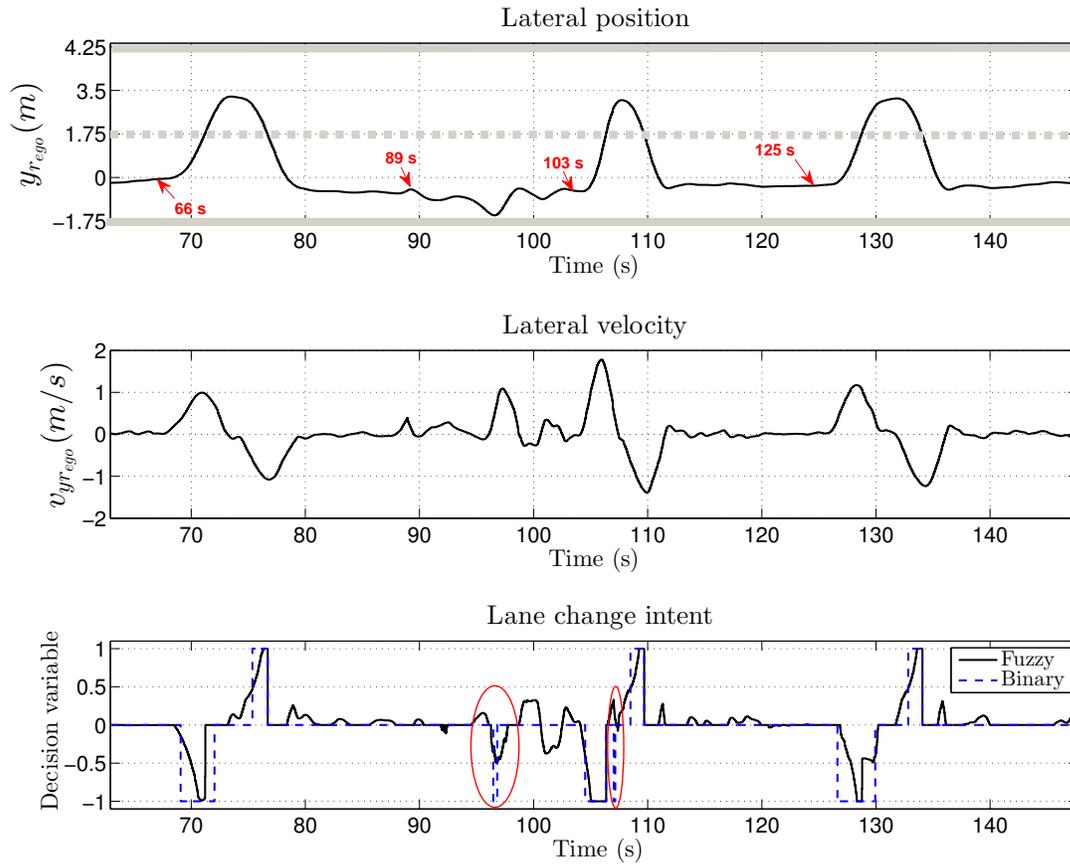


FIGURE 3.12 – Résultats de la détection d'intention

Les figures 3.12(a) et 3.12(b) montrent respectivement la trajectoire latérale du véhicule sur la route et l'évolution de sa vitesse latérale sur une fenêtre temporelle qui contient trois situations de dépassement (66s, 103s et 125s). La figure 3.12(c) quant à elle rapporte les résultats des algorithmes de détection d'intention. Le tracé en noir correspond à la sortie du système flou développé tandis que le tracé de couleur bleu en pointillés représente le résultat du système de règles binaires présenté au début de la section. La variable de décision vaut (-1) pour indiquer un changement de voie vers la gauche et (1) lorsque l'intention d'un changement de voie vers la droite est détectée. Une valeur proche de (0) signifie que l'algorithme détecte une manoeuvre de maintien de voie. Nous remarquons sur la figure que les méthodes permettent de détecter toutes les manoeuvres. Toutefois, sur la situation qui contient un virage (entre 89s et 103s) nous remarquons que la méthode binaire résulte en une fausse détection d'un changement de voie gauche due à la vitesse latérale induite par le virage. Le système flou en revanche se montre plus robuste par rapport à ce genre de perturbations.

Cela illustre l'intérêt de la méthode floue comparée au système de règles binaires qui repose sur des seuils durs dont la validité ne peut être généralisée à toutes les situations.

3.4 Prise de décision sur la manoeuvre

3.4.1 Introduction

Sur le plan de la coopération Homme-Machine, la capacité du véhicule à décider d'une manoeuvre et de l'exécuter soulève des problèmes notamment en cas de conflits. Le fonctionnement du système en concertation avec le conducteur exige que le système puisse reproduire au mieux un comportement compréhensible et prévisible pour le conducteur et dans les cas de conflits, le système doit inclure des mécanismes de gestion de l'autorité afin de répondre au mieux au besoin du conducteur.

Cette section a pour objet de détailler le module de prise de décision introduit dans le chapitre précédent en répondant à ces exigences (Fig. 2.7 Fig. 2.8).

3.4.2 État de l'art

Les systèmes d'aide au changement de voie *LCA* présentés dans le chapitre 1 sont un exemple de systèmes destinés à assister le conducteur dans le choix des manoeuvres. Toutefois, lorsque le système ne se limite pas uniquement à informer le conducteur mais exécute lui même des manoeuvres qu'il planifie, le problème devient très vite complexe. En effet, les décisions doivent être fiables afin de garantir la sécurité de l'ego-véhicule et celles des autres usagers de la route.

Les approches proposées afin de résoudre ce problème sont multiples. Certains voient la prise de décision sous forme procédurale. Par conséquent ce processus est modélisé sous formes d'automates à états discrets notamment avec des machines à états finis [211][212][213] ou des réseaux de Pétri [214]. Cette approche est similaire également aux méthodes basées sur les règles dont [215] est un exemple. L'avantage considérable de cette technique réside dans la simplicité de modélisation du comportement du véhicule pour des scénarios simples avec la retranscription sous forme de règles de haut niveau. Néanmoins, ces approches peuvent avoir des difficultés à réagir face à des changements brusques de la situation où face à des situations imprévues [212]. De plus, étendre le fonctionnement du système à des situations complexes et diversifiées devient très vite fastidieux et délicat à gérer. Notamment, au vu du grand nombre de règles inter-dépendantes qui rendent ardue l'extension de la base de règles pour inclure de nouvelles situations non traitées initialement. Par ailleurs, ces méthodes reposent généralement sur le réglage d'une multitudes de seuils permettant d'activer les règles ou les transitions (afin d'enclencher un comportement donné) ce qui rend le processus de décision assez difficilement généralisable à toutes les situations. Des techniques d'apprentissage ont également été employée dans ce cadre nous citons notamment l'utilisation des réseaux de neurones dans [216]. Toutefois, l'efficacité de ces techniques repose entièrement sur les données

d'apprentissage. Elles souffrent également du fait qu'il est difficile d'étudier les performances aux limites de fonctionnement du système ou de prédire le comportement de celui-ci face à des situations inconnues. Une approche probabiliste qui repose sur l'inférence Bayésienne a été proposée dans [36]. L'avantage de cette approche basée sur les réseaux Bayésiens réside dans la prise en compte des mesures incertaines issues des systèmes de perception. Néanmoins, outre la réactivité du système grâce à l'analyse de la situation instantanée, l'évolution de la situation de conduite doit également être prise en compte afin d'assurer un comportement de conduite jouissant d'un caractère d'anticipation. Les approches sus-mentionnées ne se prêtent pas facilement à cette exigence.

Des approches basées sur les fonctions d'utilité ont été utilisées pour des avantages de flexibilité notamment en offrant plus de facilité à traiter des scénarios complexes [217][218][219][213][154]. Cette méthode permet d'opposer plusieurs critères pondérés en vue d'évaluer et classer différentes alternatives potentielles. Malgré une difficulté apparente de cette dernière due au réglage de nombreux paramètres afin d'affiner les résultats de l'algorithme, elle a été choisie pour de nombreux avantages qu'elle offre à notre application, notamment, la possibilité de prendre en compte des états futurs de la scène de trafic. De plus, tel que modélisé par Van Der Molen [8], l'humain au niveau tactique oppose à des motivations telles que le désir d'une progression rapide sur le trajet, les coûts et risques prévisionnels qui peuvent être attribués aux différentes alternatives de manoeuvres qui s'offrent à lui pour se conformer au plan stratégique. Les motivations peuvent donc influencer la manière dont le conducteur évalue une manoeuvre potentielle. Cela s'apparente aux pondérations qui permettent de décrire l'importance de chaque critère dans le processus de décision basé sur les fonctions d'utilité.

La contribution dans ce travail réside dans la structuration du module de prise de décision pour se rapprocher de la modélisation dans le domaine de la psychologie cognitive du conducteur au niveau tactique. Elle réside également dans l'emploi d'une méthode de décision basée sur une évaluation multi-critère de la situation utilisant un modèle de prédiction qui tient compte de l'interaction entre les véhicules et ce dans le but d'offrir une prédiction réaliste de l'évolution de la scène de trafic. Ceci dote le système d'un comportement réactif à l'évolution du trafic avec une capacité d'anticipation afin de mieux évoluer dans l'environnement. Par ailleurs, nous utilisons une métrique qui permet une évaluation rapide du risque en donnant la flexibilité de modéliser différents comportements face au risque en variant le degré d'agressivité du système. Enfin, cette approche permet au système d'offrir une interaction plus riche au niveau de la manoeuvre notamment avec la possibilité de proposer plus d'une seule manoeuvre si la situation s'y prête afin de minimiser le risque de conflit lors du choix coopératif de la manoeuvre.

Enfin, ce module alimente celui de la planification de trajectoire afin de calculer une

trajectoire lisse respectant la dynamique véhicule et garantissant une exécution sans collision des manoeuvres (cf. 4.2)

3.4.3 Approche de prise de décision sur la manoeuvre

Les objectifs du module de prise décision sont :

- permettre à l’ego-véhicule de s’adapter aux conditions de trafic et à l’infrastructure,
- maintenir la sécurité du véhicule et garantir une progression satisfaisante sur le trajet global,
- permettre une interaction haut niveau (manoeuvre) avec le conducteur.

Par ailleurs les manoeuvres doivent respecter des exigences importantes telles que l’évitement de collisions avec les obstacles, le respect du code de la route et tenir compte des limites du véhicule. Pour les besoins de l’algorithme nous supposons que l’ego-véhicule dispose d’une perception de ses propres positions et vitesses ainsi que de celles des véhicules du trafic sur une certaine portée (jusqu’à 200 mètres [213]). Les travaux sur la détection des panneaux de signalisation et des types de marquages permettent également de fournir des informations importantes à considérer dans le processus de décision.

Rappelons la structure générale du module de prise de décision sur la figure 2.8. Le bloc "*Possible Manoeuvres*" a pour rôle de catégoriser la situation de conduite afin de ne retenir que les manoeuvres possibles par rapport au scénario de conduite (conduite sur autoroute, rond-point, intersection...) et au type d’infrastructure (nombres de voies, sens de circulation...). A partir d’un catalogue de manoeuvres, ce module ne retient que celles qui sont pertinentes à la situation en cours pour qu’elles soient évaluées et concourent au processus de décision. Typiquement dans le cas d’usage traité, les possibilités se limitent aux différents changements de voies et les différentes manoeuvres longitudinales pour évoluer avec le trafic à savoir le suivi de véhicule, la régulation de vitesse et le freinage d’urgence.

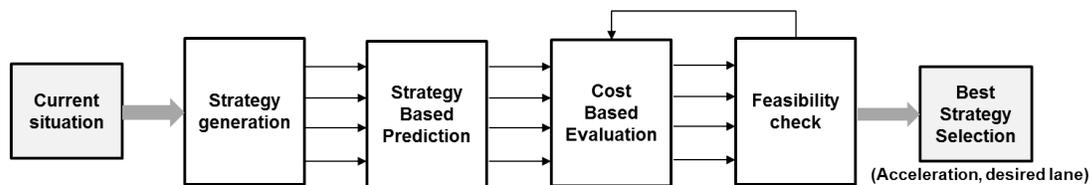


FIGURE 3.13 – Structure du module de prise de décision de la manoeuvre

Le bloc "*Motivations*" regroupe des jeux de pondérations prédéfinies afin de moduler le comportement du système au niveau tactique.

Avant d’aller plus loin dans les détails, nous aimerions présenter le diagramme de flux de données de l’évaluation des manoeuvres. Le processus suit les étapes suivantes :

- Génération de stratégies candidates à la décision
- La prédiction de la scène de trafic (figure 3.14) en considérant différentes stratégies ce qui résulte en plusieurs « scénarios » décrits par des trajectoires spatio-temporelles de l'ego-véhicule ainsi que des autres véhicules de trafic
- L'évaluation de chaque scénario en fonction de plusieurs critères incluant le risque de collision, de changement de voie, la progression sur le trajet, le respect de la vitesse désirée du conducteur etc. . .
- L'identification de la/les stratégie(s) qui permet(tent) de minimiser la fonction de coût
- L'évaluation de la faisabilité à l'instant actuel
- Le choix de la manoeuvre adéquate

Ces étapes sont décrites dans la figure (3.13).

3.4.3.1 Génération des stratégies candidates

Les manoeuvres retenues par le bloc "*Possible Manoeuvres*" constituent le point de départ à partir duquel un certain nombre de stratégies potentielles sont dérivées pour le processus d'évaluation et de classement.

Ces stratégies sont issues du couplage de deux actions selon les deux axes : longitudinal et latéral. Pour le mouvement longitudinal ces actions s'apparentent au choix d'une certaine accélération (décélération, accélération ou vitesse constante). Pour le mouvement latéral, l'action réside dans le choix d'une voie parmi celles disponibles.

$$\mathcal{A}_{str} = \{a_{str_i} \mid a_{str_i} = b_{max} + i.\delta a, \quad i \in [0, N_{str}]\} \quad (3.33)$$

$$\mathcal{L}_{str} \in \{-1, 0, 1\} \quad (3.34)$$

où \mathcal{A}_{str} et \mathcal{L}_{str} représentent l'ensemble d'actions potentielles de l'ego-véhicule sur les axes longitudinal et latéral respectivement. \mathcal{A}_{str} est un ensemble d'accélération candidates à la décision dans une plage allant de la décélération à l'accélération maximales admises. b_{max} représente la décélération maximale et est choisie égale à $-2.8m.s^{-2}$. δa est l'incrément d'accélération considéré et i est l'indice permettant de construire l'ensemble \mathcal{A}_{str} . L'accélération maximale sera donc égale à : $a_{max} = b_{max} + N_{str}.\delta a$.

D'autre part, \mathcal{L}_{str} représente l'ensemble de voies cibles potentielles à savoir : ($\mathcal{L}_{str} = 0$) est la voie actuelle et ($\mathcal{L}_{str} = \pm 1$) réfère aux voies de droite et de gauche respectivement.

La décision de manoeuvre à chaque instant est constituée par le couple $\{\mathcal{A}_{str}^{opt}, \mathcal{L}_{str}^{opt}\}$ minimisant la fonction de coût présentée plus loin.

3.4.3.2 Prédiction de la scène de trafic

L'idée de notre méthode se rapproche de la technique MPC (Model Predictive Control) où à chaque pas d'exécution, une prédiction de la scène est effectuée pour chaque stratégie potentielle de l'ego-véhicule construisant ainsi plusieurs scénarios potentiels. Chaque scénario est par la suite évalué à chaque instant de prédiction pour déterminer la meilleure stratégie. L'avantage réside dans le fait que la décision à chaque instant tient compte de l'évolution future de la situation de conduite. De plus, une fréquence élevée de l'algorithme permettrait à l'ego-véhicule de réagir à des changements rapides dans la situation de conduite et même d'annuler par exemple une manoeuvre initiée.

En considérant l'horizon de prédiction H_p , t_p qui dénote le vecteur temps est obtenu par :

$$t_p = \{t_{p_q} \mid t_{p_q} = q \cdot \Delta t_p, \quad q \in [0, H_p/\Delta t_p]\} \quad (3.35)$$

Δt_p est le pas de temps de la prédiction qui devra être choisi de manière à ce que $H_p/\Delta t_p \in \mathbb{N}$. L'évolution de l'ego-véhicule pour chaque stratégie à l'instant d'exécution k est donnée par :

$$\begin{cases} \forall a_{str_i} \in \mathcal{A}_{str}, \forall l_{str_j} \in \mathcal{L}_{str} : \\ v_{ego_{i,j}(k+q|k)} = v_{ego_{i,j}(k+q-1|k)} + a_{str_i} \cdot \Delta t_p \\ x_{ego_{i,j}(k+q|k)} = x_{ego_{i,j}(k+q-1|k)} + v_{ego_{i,j}(k+q|k)} \cdot \Delta t_p + \frac{1}{2} a_{str_i} \cdot \Delta t_p^2 \\ y_{ego_{i,j}(k+q|k)} = y_{ego_{i,j}(k+q-1|k)} + \Delta y_{ego_{i,j}(k+q|k)}(l_{str_j}) \end{cases} \quad (3.36)$$

Sur la base de la voie cible l_{str_j} , une trajectoire polynomiale appropriée est générée pour prédire le déplacement latéral de l'ego-véhicule durant le scénario et l'écart latéral à chaque instant de prédiction q est donné par $\Delta y_{ego_{i,j}(k+q|k)}(l_{str_j})$ (le calcul d'une trajectoire polynomiale est expliqué dans la section 4.2.3). L'équation 3.36 donne l'évolution de la vitesse $v_{ego_{i,j}}$ et positions $x_{ego_{i,j}}, y_{ego_{i,j}}$ pour chaque stratégie potentielle $\{a_{str_i}, l_{str_j}\}$ sur l'horizon temporel H_p à partir de l'instant k .

A partir de la prédiction de la trajectoire spatio-temporelle de l'ego-véhicule une prédiction de la scène de trafic représentée dans la figure 3.14 est effectuée. Afin que l'évolution de celle-ci soit proche de la réalité il est nécessaire de prendre en compte les interactions entre chaque véhicule. Pour des raisons de simplicité nous considérons que le mouvement de chaque véhicule n'influencera que les véhicules qui le suivent sur les trois voies (Les véhicules $F_{(-1)}$, $F_{(0)}$ et $F_{(1)}$ sur Fig. 3.14 suivent l'ego-véhicule). Par conséquent, chaque stratégie de l'ego-véhicule produira un scénario de trafic différent.

A cet effet, nous utilisons un modèle microscopique de trafic qui simule le comportement longitudinal d'un conducteur en présence de véhicules. Parmi une multitude de modèles

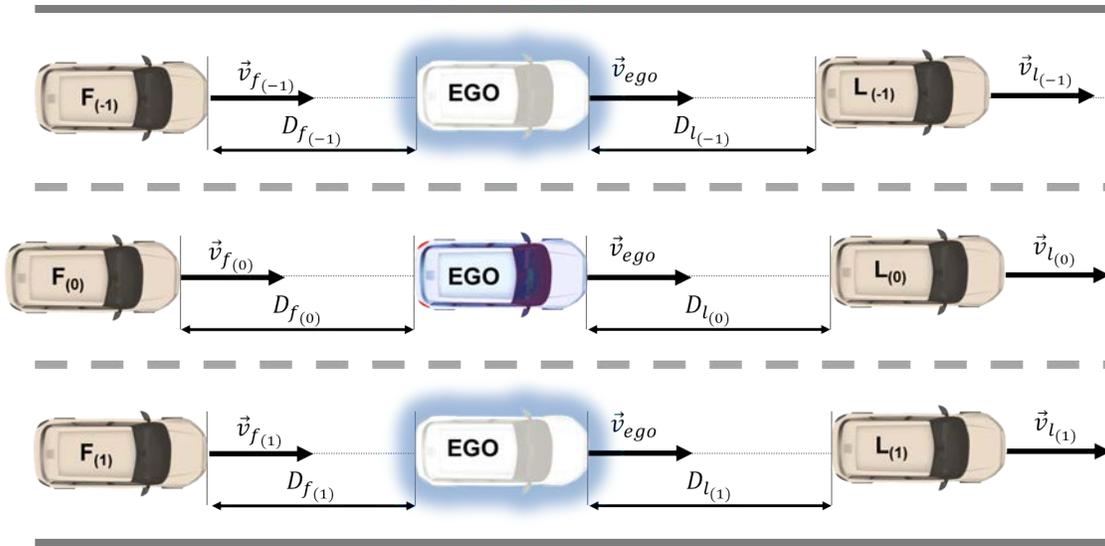


FIGURE 3.14 – Représentation de l’environnement de l’ego véhicule pour la prise de décision

existant dans la littérature, notre choix s’est porté sur l’IDM (Intelligent Driver Model) [220]. Ce modèle a de nombreux avantages par rapport à d’autres notamment en alliant une formulation mathématique simple pour reproduire un comportement de suivi de véhicule réaliste. Ce modèle exprime donc l’accélération longitudinale d’un véhicule selon les équations suivantes :

$$a_{mal}(v, D^*) = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_{des}} \right)^\beta - \left(\frac{D^*}{D} \right)^2 \right] \quad (3.37)$$

avec a l’accélération maximale du véhicule, v la vitesse actuelle, v_{des} la vitesse désirée et β un exposant de l’accélération. D représente la distance inter-véhiculaire avec le véhicule leader et D^* est la distance inter-véhiculaire minimale. Cette dernière est calculée comme suit :

$$D^*(v, \Delta v) = D_0 + Tv + \frac{v \cdot \Delta v}{2\sqrt{a \cdot b}} \quad (3.38)$$

où D_0 est une distance statique minimale avec le véhicule leader, T le temps inter-véhiculaire minimal, Δv le différentiel de vitesse avec le véhicule leader et b la décélération maximale tolérée.

Enfin, pour chaque stratégie $\{a_{str_i}, l_{str_j}\}$ la prédiction de l’évolution de chaque véhicule

$V_{(n)}$ de la scène de trafic \mathcal{V} à partir de l'instant k est donnée par :

$$\begin{cases} \forall a_{str_i} \in \mathcal{A}_{str}, \forall l_{str_j} \in \mathcal{L}_{str}, \forall V_{(n)} \in \mathcal{V} : \\ a_{n(k+q|k,i,j)} = a_{mdl}\left(v_{n(k+q-1|k,i,j)}, D_{n(k+q-1|k,i,j)}^*\right) \\ v_{n(k+q|k,i,j)} = v_{n(k+q-1|k,i,j)} + a_{n(k+q|k,i,j)} \cdot \Delta t_p \\ x_{n(k+q|k,i,j)} = x_{n(k+q-1|k,i,j)} + v_{n(k+q|k,i,j)} \cdot \Delta t_p + \frac{1}{2} a_{n(k+q|k,i,j)} \cdot \Delta t_p^2 \\ y_{n(k+q|k,i,j)} = y_{n(k+q-1|k,i,j)} + \Delta y_{n(k+q|k,i,j)}(l_{n_{intent}(k)}) \end{cases} \quad (3.39)$$

$l_{n_{intent}(k)}$ est l'intention détectée du véhicule $V_{(n)}$ au début de la prédiction i.e l'instant k . De la même manière que pour l'ego-véhicule, une trajectoire polynomiale est générée pour prédire son déplacement latéral vers la voie qu'il a l'intention d'atteindre. La méthode de détection d'intention est détaillée dans la section 3.3.

3.4.3.3 Évaluation de la stratégie de conduite

Une fois la scène de trafic prédite pour chaque stratégie de l'ego-véhicule créant ainsi plusieurs scénarios potentiels, il est nécessaire d'évaluer chacun d'eux afin de déduire la stratégie qui garantit la meilleure issue de la situation. Tout d'abord il faut spécifier les critères sur la base desquels la situation est évaluée. Tel que spécifié précédemment, les décisions du système doivent être régies par le désir d'accomplir le plan stratégique afin d'atteindre la destination visée tout en tenant compte des risques environnants et de l'aspect légal de la conduite. L'aspect légal fait référence au respect de la vitesse légale, de l'interdiction des dépassements par la droite, du non franchissement des lignes blanches et enfin à la préférence de la voie la plus à droite autant que possible. Le risque pris en compte à ce niveau est le risque de collision avec les véhicules environnants. D'autres formes de risque sont prises en compte directement dans l'étape de planification de trajectoire.

A cet effet, nous définissons une fonction de coût qui permet d'évaluer la scène de trafic à un instant donné avec l'équation :

$$\mathcal{C}_{i,j,q} = \mu_{risk} \mathcal{C}_{i,j,q}^{risk} + \mu_{progres} \mathcal{C}_{i,j,q}^{progres} + \mu_{legal} \mathcal{C}_{i,j,q}^{legal} \quad (3.40)$$

μ_{risk} , μ_{legal} et $\mu_{progres}$ sont des pondérations positives de chaque terme et $\mathcal{C}_{i,j,q}^{risk}$, $\mathcal{C}_{i,j,q}^{progres}$ et $\mathcal{C}_{i,j,q}^{legal}$ sont les coûts liés au risque, à la progression sur le trajet et à l'aspect légal à chaque instant q de la prédiction et pour chaque stratégie potentielle $\{a_{str_i}, l_{str_j}\}$.

Évaluation du risque de la situation La prise de décision est intimement liée aux travaux sur l'évaluation de la situation. Ces travaux visent à établir une compréhension de la situation de la conduite avec un regard sur les activités, les manœuvres, les positions et les propriétés des obstacles mobiles ou statiques sur la scène pour pouvoir prédire son évolution

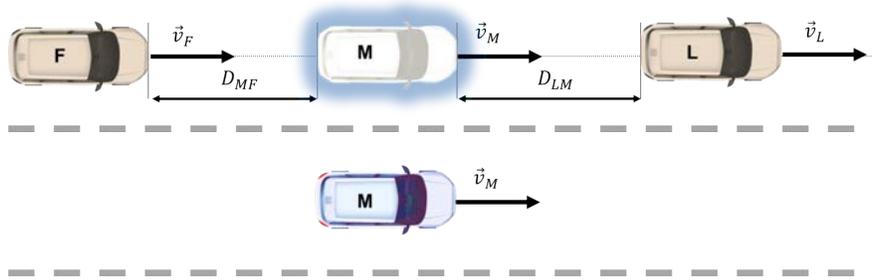


FIGURE 3.15 – Représentation des véhicules sur la voie adjacente pour l'évaluation du risque de changement de voie

et identifier les risques [221]. Ainsi, l'analyse de la situation est un élément clé dans la prise de décision. De ce fait, il existe de nombreux travaux dans la littérature visant à établir des métriques sur lesquelles il est possible de baser la décision du système. L'évaluation du risque de la situation reste sans doute la métrique la plus cruciale pour répondre à l'exigence première du système qui est de garantir la sécurité. Plusieurs métriques pour caractériser le risque ont été étudiées. Parmi elles, des métriques communément utilisées à l'exemple du TLC (Time to Line Crossing) [188], TTC (Time-To-Collision) et le TG (Time Gap) aussi appelé TIV (Temps Inter-Véhiculaire) [156]. D'autres critères peuvent être retrouvés également à l'exemple du TPMD (Time to Minimum Predicted Distance) [221], DST (Deceleration To Safety Time) [36], TTR (Time To React) [185] ou encore l'espacement minimal de sécurité MSS (Minimum Safety Spacing) [34][222][223].

Cette dernière métrique est tirée des modèles cinématiques de changement de voie qui visent à déterminer l'espacement nécessaire (MSS) avec le trafic environnant qui permet de réussir un changement de voie et de s'insérer correctement sur la voie adjacente. Cet espacement est déterminé à partir d'hypothèses sur le comportement des véhicules de trafic. Sur cette base, une méthode d'évaluation rapide du risque est proposée. Le risque d'une manoeuvre se résume au risque frontal de collision avec le véhicule leader et un risque de collision arrière avec le véhicule suiveur comme montré sur la figure 3.15. **M** est l'ego véhicule, **L** est le véhicule leader et **F** est le véhicule suiveur.

Afin de déterminer les espacements limites permettant d'éviter une collision, l'ego véhicule est supposé garder une accélération constante durant la manoeuvre. Par la suite, deux hypothèses sont émises sur le comportement des véhicules du trafic. Nous faisons une hypothèse conservative permettant de considérer le pire cas et une autre dite nominale caractérisant un comportement normal de véhicule de trafic.

Pour évaluer le risque de collision avec le véhicule leader **L** on considère le cas nominal où il maintient son accélération actuelle. L'évolution de l'espacement longitudinal entre l'ego-

véhicule et le leader est donnée par :

$$D_{LM}(t) = D_{LM}(0) + v_{LM}(0).t + 1/2a_{LM}(0).t^2, \quad t \in [0, T_m] \quad (3.41)$$

Avec : v_{LM} et a_{LM} sont respectivement la vitesse et l'accélération relative entre les véhicules **M** et **L**. T_m est la durée de la manoeuvre qui pourrait être la durée prévue d'un changement de voie par exemple. D'une manière générale ce temps peut être interprété comme le temps durant lequel on s'assure qu'il n'y a pas de chevauchement des trajectoires des véhicules considérés.

Dans ce cas, le MSS permettant d'éviter une collision dans ce cas est donné par :

$$FMSS_{min} = \max(-v_{LM}(0).t - 1/2a_{LM}(0).t^2), \quad t \in [0, T_m] \quad (3.42)$$

Le pire cas lorsqu'on évalue le risque frontal serait que le véhicule s'arrête brusquement. L'espacement minimal afin d'éviter une collision dans ce cas est donné par l'équation :

$$FMSS_{safe} = \max(V_M(0).t + 1/2a_M(0).t^2), \quad t \in [0, T_m] \quad (3.43)$$

où : v_M et a_M représentent, respectivement, la vitesse et l'accélération de l'ego-véhicule.

Un avantage de cette approche réside dans l'expression du MSS qui admet une solution analytique évitant ainsi tout calcul explicite des trajectoires des véhicules, ce qui s'avère gourmand en temps de calcul.

Pour l'estimation du risque de collision à l'arrière, le véhicule suiveur (F) est supposé garder une accélération constante au long de la manoeuvre.

A partir de l'équation d'évolution de l'espacement entre les véhicules **F** et **M** donnée par :

$$D_{MF}(t) = D_{MF}(0) + v_{MF}(0).t + 1/2a_{MF}(0).t^2, \quad t \in [0, T_m] \quad (3.44)$$

Nous déterminons l'espacement minimal permettant la réalisation de la manoeuvre sans collision :

$$RMSS_{min} = \max(-v_{MF}(0).t - 1/2a_{MF}(0).t^2), \quad t \in [0, T_m] \quad (3.45)$$

Et celui permettant d'effectuer la manoeuvre en respectant la distance de sécurité.

$$RMSS_{safe} = RMSS_{min} + t_{react}.v_F(T_m) + \frac{v_{MF}^2(t_{min})}{2a_{MFmax}} \quad (3.46)$$

$$t_{min} \in [0, T_m] \mid D_{MF}(t_{min}) = \min(D_{MF}(t))$$

Où D_{MF} , v_{MF} et a_{MF} sont, respectivement, l'espacement, la vitesse relative et l'accélération relative entre l'ego-véhicule et le véhicule suiveur. t_{react} et a_{MFmax} représentent, respectivement, un temps de réaction et la décélération relative maximale entre les deux véhicules.

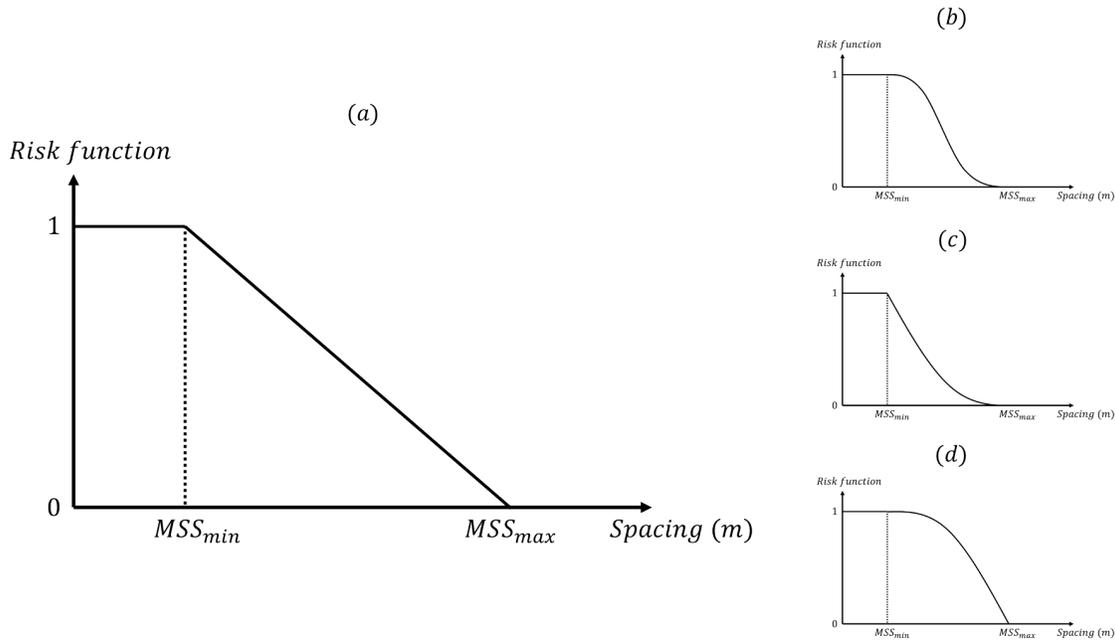


FIGURE 3.16 – Fonction de risque : probabilité de collision en fonction de l'espacement

Une fonction de risque $r(V_1, V_2, T_m)$ caractérisant la probabilité de collision entre deux véhicules V_1 et V_2 est construite sur la base des deux valeurs limites de l'espacement longitudinal. Ces deux valeurs de l'espacement longitudinal sont calculées à chaque pas de temps pour deux hypothèses qui représentent le cas nominal et le pire cas. La figure 3.16 illustre la probabilité de collision en fonction de l'espacement avec le véhicule de trafic. MSS_{min} et MSS_{safe} sont, respectivement, l'espacement minimal afin d'exécuter une manoeuvre sans collision dans le cas nominal et le pire cas. D'une part, si dans le cas nominal l'espacement actuel mène à une collision, le risque de collision est maximal. D'autre part, si en considérant le pire cas, l'espacement actuel ne conduit pas à une collision alors le risque de la manoeuvre est nul. Il existe différentes manières de considérer l'évolution du risque entre ces deux limites. La figure 3.16(a) suppose que le risque évolue linéairement. Il est possible de considérer d'autres formes d'évolution non linéaire (Fig. 3.16(b),(c) et (d)) qui pourraient définir un comportement plus ou moins agressif vis-à-vis du risque.

Pour finir, le terme lié au risque lors de l'évaluation de la fonction de coût dans l'équation 3.40 est donné par :

$$\mathcal{C}_{i,j,q}^{risk} = \mu_{risk_{F_j}} r(V_{F_{i,j,q}(j)}, V_{ego_{i,j,q}}, T_{m_j}) + \mu_{risk_{L_j}} r(V_{ego_{i,j,q}}, V_{L_{i,j,q}(j)}, T_{m_j}) \quad (3.47)$$

où : $\mu_{risk_{F_j}}$ et $\mu_{risk_{L_j}}$ constituent les pondérations du risque frontal et le risque à l'arrière respectivement. T_{m_j} représente le temps de la manoeuvre et dépend donc de la voie cible l_{str_j} . Dans le cas ou celle-ci est ± 1 i.e un changement de voie, $T_{m_j=\pm 1} = 4$ s. Pour du maintien de voie i.e $l_{str_j} = 0$, le temps de la manoeuvre est : $T_{m_j=0} = 2$ s.

$r(V_{F_{i,j,q}(j)}, V_{ego_{i,j,q}}, T_{m_j})$ se lit : le risque de collision entre le véhicule $V_{F_{i,j,q}(j)}$ et le véhicule $V_{ego_{i,j,q}}$ sur la durée de T_{m_j} secondes.

Le terme $\mathcal{C}_{i,j,q}^{progres}$ de l'équation 3.40 est donné par l'équation :

$$\mathcal{C}_{i,j,q}^{progres} = (v_{ego_{i,j,q}} - v_{ref})^2 \quad (3.48)$$

où v_{ref} est le minimum entre la vitesse désirée du conducteur $v_{desired}$ et la vitesse limite du tronçon v_{legal} :

$$v_{ref} = \min(v_{desired}, v_{legal}) \quad (3.49)$$

Ce terme lie le souhait de progresser à la vitesse désirée du conducteur à une partie de l'aspect légal due au respect de la vitesse limite. Enfin, le reste des règles du code de la route constitue le terme suivant :

$$\mathcal{C}_{i,j,q}^{legal} = \mu_{overtake_{right}} \cdot r(V_{ego_{i,j,q}}, V_{L_{i,j,q}(j-1)}, T_{m_{j-1}}) - \mu_{lane_{right}} \cdot \Delta_{lane}(j) + \mu_{marking} \cdot \Delta_{marking}(j) \quad (3.50)$$

Le premier terme permet d'éviter le dépassement par la droite. Il représente un risque virtuel de collision avec le véhicule leader sur la voie adjacente gauche de l'ego-véhicule. Il est préférable de choisir un $T_{m_{j-1}}$ assez petit afin de ne pas laisser une grande distance au véhicule de gauche. Le deuxième terme récompense la conduite à droite. Avec un signe négatif, Δ_{lane} retranche au coût de chaque voie une certaine valeur afin de favoriser la voie la plus à droite.

Enfin, $\Delta_{marking}$ est un booléen caractérisant la nature du marquage de la voie. Ce terme a pour but de pénaliser les franchissements de ligne continue. $\Delta_{marking}(j) = 0$ si $l_{str_j} = 0$ (i.e correspond à la voie actuelle) ou si $l_{str_j} = \pm 1$ et le marquage est discontinu.

3.4.3.4 Classement des stratégies

Le classement des stratégies se fait par l'agrégation des coûts de chaque stratégie $\{a_{str_i}, l_{str_j}\}$ sur l'horizon de prédiction suivant l'équation suivante :

$$\mathcal{C}_{i,j} = \sum_{q=1}^{H_p/\Delta t_p} \mathcal{C}_{i,j,q} \quad (3.51)$$

$\mathcal{C}_{i,j}$ se présente sous forme d'une matrice $3 \times N_{str}$ où 3 représente le nombre d'actions latérales possibles et N_{str} le nombre d'accélération candidates à la situation (se référer aux équations 3.33 et 3.34).

Il est possible de déduire la stratégie optimale qui minimise la fonction de coût suivant l'équation :

$$\begin{aligned} \{\mathcal{A}_{str}^{opt}, \mathcal{L}_{str}^{opt}\} &= \{a_{str_{i_{opt}}}, l_{str_{j_{opt}}}\} \\ \text{ou } \{i_{opt}, j_{opt}\} &= \underset{i,j}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{C}_{i,j}) \end{aligned} \quad (3.52)$$

A des fins de coopération nous préférons dériver une stratégie pour chaque voie (l'accélération optimale pour chaque voie) afin d'arbitrer entre l'intention du conducteur et celle du système en cas de conflit.

$$a_{str_{i_{opt}}}(j) \mid i_{opt}(j) = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(\mathcal{C}_{i,j}) \quad (3.53)$$

Par ailleurs, à partir de $\mathcal{C}_{i,j}$, il est possible de dériver une grille de manoeuvres combinant les trois manoeuvres élémentaires longitudinales (accélérer, garder sa vitesse et décélérer) et latérales (changer de voie vers la gauche, rester sur sa voie et changer de voie vers la droite) comme montré sur la figure 3.17. Cette grille peut contenir la manoeuvre préconisée par le système i.e la manoeuvre optimale mais également d'autre alternatives possibles.

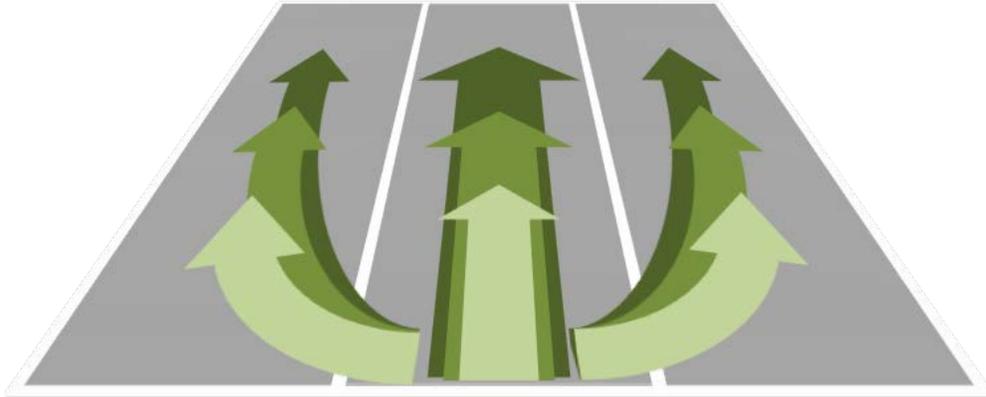


FIGURE 3.17 – Grille de manoeuvre pour l'interaction haut niveau avec le conducteur

Cela peut être utile lorsque l'on veut permettre une interaction entre le système et le conducteur autour du choix de la manoeuvre. Il suffirait donc de considérer trois plages d'accélération : les accélérations autour de zéro qui correspondent au maintien de sa vitesse, les accélérations positives qui représentent le mouvement longitudinal accéléré et enfin les

accélérations négatives représentant les manoeuvres de décélération.

3.4.3.5 Vérification de la faisabilité

La vérification de faisabilité ne concerne que les changements de voie. Il est important de s'assurer que les écarts disponibles avec les véhicules de trafic permettent d'exécuter la manoeuvre en toute sécurité. Cela se traduit pour un changement de voie vers la gauche par exemple par le fait qu'il n'y ait pas de collision non seulement avec les véhicules $\mathbf{L}_{(-1)}$, $\mathbf{F}_{(-1)}$ sur la voie adjacente mais également avec le véhicule leader $\mathbf{L}_{(0)}$ sur la voie en cours tout au long de la manoeuvre (Fig. 3.14). A cet effet, nous utilisons également la fonction de risque introduite précédemment à l'instant k .

La condition de faisabilité est donnée par :

$$\max(r_{(V_{ego}(k), V_{L_{(-1)}}(k), T_{lcm})}, r_{(V_{ego}(k), V_{L_{(-1)}}(k), T_{lcm})}, r_{(V_{ego}(k), V_{L_{(0)}}(k), T_{lcm}/2)}) < \gamma_{th} \quad (3.54)$$

où γ_{th} est un seuil sur le risque de la situation. T_{lcm} est la durée prévue pour le changement de voie.

Cette étape est importante car elle empêche des changements de voie désirables mais qui ne sont pas sécurisés. En outre, les incertitudes qui résultent de l'étage de perception peuvent être prises en compte par exemple en majorant les distances de sécurité que l'ego-véhicule doit maintenir par rapport au niveau de confiance des mesures.

3.4.4 Résultats expérimentaux et de simulation

3.4.4.1 Résultats de simulation du modèle de prédiction IDM

La figure 3.18 présente les résultats de simulation du modèle IDM. Le scénario montre deux véhicules évoluant sur la même voie. A l'instant $t = 0$ s le véhicule suiveur se trouve à la position $x_F = 50$ m et a une vitesse de départ $v_F = 10$ m.s⁻¹. Le véhicule leader est à la position $x_L = 1300$ m et une vitesse $v_L = 10$ m.s⁻¹ qu'il gardera tout au long du scénario. Au début du scénario, le véhicule suiveur accélérera dans le but d'atteindre sa vitesse désirée $v_{des} = 30$ m.s⁻¹ mais décélérera aussitôt afin de garder une inter-distance sécuritaire lorsqu'il arrive sur le véhicule leader plus lent jusqu'à la fin de la simulation. Les figures 3.18(a), (b), (c) et (d) montrent respectivement les positions longitudinales, l'espacement, les vitesses et les accélérations des deux véhicules du scénario.

3.4.4.2 Résultats de l'évaluation du risque

Les résultats de l'évaluation du risque de changement de voie sont présentés en simulation. Le déplacement longitudinal de l'ego-véhicule et d'un véhicule leader sont simulés avec des

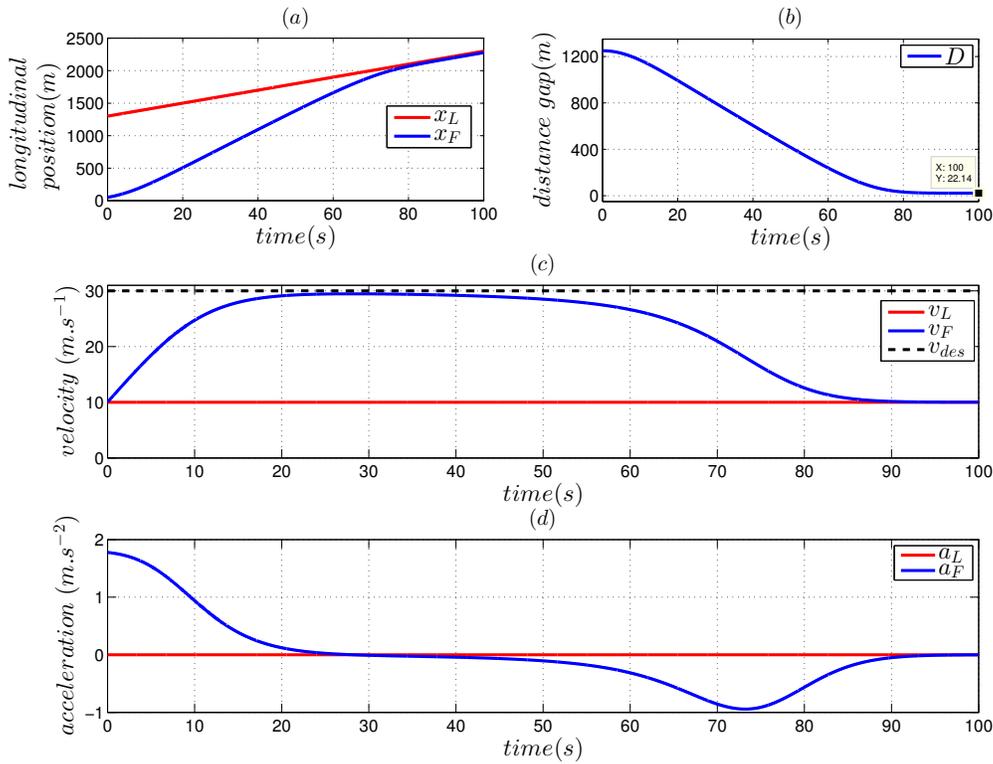


FIGURE 3.18 – Simulation du modèle IDM
 ($a = 1.8 \text{ m.s}^{-2}$, $b = 1.8 \text{ m.s}^{-2}$, $\beta = 4$, $D_0 = 2 \text{ m}$, $T = 2 \text{ s}$)

modèles cinématiques. Le scénario est illustré sur la figure 3.19. Au début du scénario, l'ego-véhicule a une vitesse $v_M = 15 \text{ m.s}^{-1}$ et une accélération $a_M = 1.5 \text{ m.s}^{-2}$. Le véhicule leader sur la voie adjacente commence avec une vitesse $v_L = 20 \text{ m.s}^{-1}$ et une accélération $a_L = 0.5 \text{ m.s}^{-2}$. L'espacement initial séparant les deux véhicules est $D_{LM} = 200 \text{ m}$ et les deux véhicules maintiennent une accélération constante durant le scénario. La figure 3.19(a) montre les positions des deux véhicules **M** (en bleu) et **L** (en rouge) avec une numérotation pour distinguer les différents échantillons relevés du scénario.

La figure 3.19(c) montre l'évolution de l'espacement réel D_{LM} et des espacements minimaux calculés ($FMSS_{min}$ et $FMSS_{safe}$) durant le scénario. La figure 3.19(b) présente le résultat de l'estimation du risque frontal lié à un changement de voie vers la gauche. Avant l'instant $t = 12.5 \text{ s}$, l'espacement D_{LM} entre les deux véhicules est supérieur à la limite $FMSS_{safe}$ (Fig. 3.19(c)) ce qui signifie que la situation ne représente aucun risque (Fig. 3.19(b)). Passé cet instant, le risque commence à croître lorsque l'espacement atteint 158 m et passe en dessous du $FMSS_{safe}$ (Fig. 3.19(c)). Le risque continue à augmenter à l'approche du véhicule en tête et atteint 1 lorsque l'espacement passe en dessous de la limite critique

$FMSS_{safe}$ à l'instant $t = 17.75 s$. Le risque égalera 1 pour indiquer l'impossibilité d'un dépassement sans collision avec le véhicule leader et revient à 0 lorsque ce dernier est dépassé. Il en va de même pour l'évaluation des risques à l'arrière.

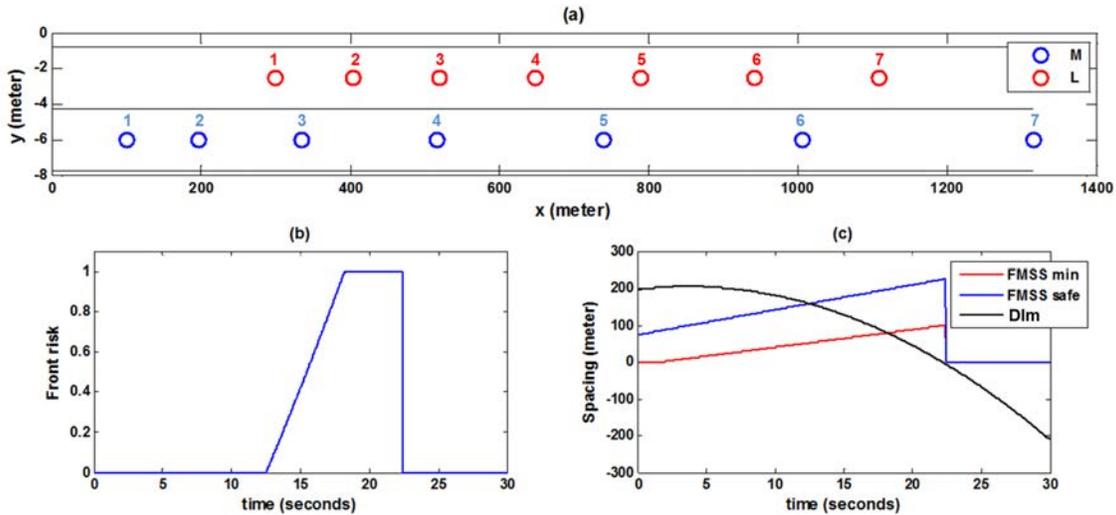


FIGURE 3.19 – Résultats de l'estimation du risque de changement de voie vers la gauche

3.4.4.3 Résultats de la prise de décision

Dans le but d'illustrer les résultats de l'approche de prise de décision présentée au long de cette section, nous avons simulé un scénario de conduite aléatoire sur autoroute à 3 voies. La figure 3.20 représente la scène de trafic autour de l'ego-véhicule à plusieurs instants du scénario.

Pour chaque instant, l'ego-véhicule (en bleu) ainsi que les autres véhicules (en rouge) sont représentés sur les trois voies. La scène est toujours centrée autour de l'ego-véhicule et pour des raisons de lisibilité de la figure, nous nous limitons à afficher la situation sur 100 m devant et 50 m derrière l'ego-véhicule. Afin de distinguer les véhicules de trafic lors de l'évolution du scénario, ces derniers sont numérotés. L'instant de la scène est indiqué au dessus de chaque illustration.

La figure 3.21(a) montre l'évolution des fonctions de coût attribuées à chaque voie. $\mathcal{C}_{(1)}$, $\mathcal{C}_{(0)}$ et $\mathcal{C}_{(-1)}$ correspondent aux coûts de la voie de droite, de la voie courante et de la voie de gauche respectivement. Il est à noter que l'on se réfère à la voie actuelle de l'ego-véhicule pour déterminer chaque voie. Par exemple, la voie courante deviendra celle de droite après que l'ego véhicule se déporte sur la voie de gauche.

Pour mieux comprendre le comportement de l'ego-véhicule, sa vitesse et celle des véhicules leaders sont représentées sur la figure 3.21(b). La notation $X_{(i)}$ suit la même logique expliquée précédemment i.e $v_{l_{(0)}}$ dénote la vitesse du véhicule leader sur la voie actuelle. Les instants

auxquels sont prises les scènes sur la figure 3.20 sont rapportés sur la figure 3.21.

La vitesse désirée de l'ego-véhicule est de 30 m.s^{-1} . Afin de favoriser les situations de dépassement, les vitesses des véhicules de trafic sont légèrement inférieures.

La scène représentée à l'instant $t = 7\text{ s}$ (Fig. 3.20(a)), montre l'ego-véhicule sur la voie de droite, voie recommandée par le code de la route. Pendant cette première phase du scénario, sa vitesse est autour de 22 m.s^{-1} qui est inférieure à la vitesse désirée de 30 m.s^{-1} comme on peut le voir sur la figure 3.21(b). A cet effet, il accélère pour se mettre à la vitesse du véhicule de gauche (véhicule **1**) (qui est également inférieure à la vitesse désirée) pour ne pas enfreindre la règle du dépassement par la droite.

Alors que l'ego-véhicule se rapproche du véhicule leader sur sa voie (véhicule **2**) et dont la vitesse est nettement inférieure à la sienne (Fig. 3.21(b)), le coût de la voie actuelle augmente progressivement et celui de la voie de gauche diminue comme l'illustre la figure 3.21(a) ($t \in [0, 8\text{ s}]$).

A $t = 8\text{ s}$, le coût de la voie de gauche devient inférieur à celui de la voie actuelle (Fig. 3.21(a)). Cela marque l'instant où l'ego-véhicule initie un changement de voie à gauche (Fig. 3.20(b)).

Une fois sur la voie du milieu, la possibilité de dépasser le véhicule **1** pour atteindre la vitesse désirée s'offre à l'ego-véhicule qui continue vers la voie la plus à gauche (Fig. 3.20(c), (d), (e), (f) et (g)). Pendant cette phase, plusieurs véhicules lents sur la voie la plus à droite sont dépassés (véhicule **2,3** et **4**). On peut remarquer sur la figure 3.21(b) que l'ego-véhicule accélère jusqu'à la vitesse désirée. Lorsque le véhicule ego atteint la troisième voie ($t \in [19, 52\text{ s}]$), le coût du changement de voie vers la gauche (en noir sur la figure 3.21(a)) augmente considérablement dû aux marquages continus et à l'inexistence d'une voie praticable. Alors que l'ego-véhicule approche du véhicule **1**, le coût de la voie de droite augmente progressivement.

Lorsque le véhicule **1** est dépassé et que la possibilité de se rabattre s'ouvre, la voie de droite obtient le coût le plus bas (3.21(a)) et le véhicule initie la manoeuvre pour rejoindre la voie de droite comme le montre la figure 3.20(h).

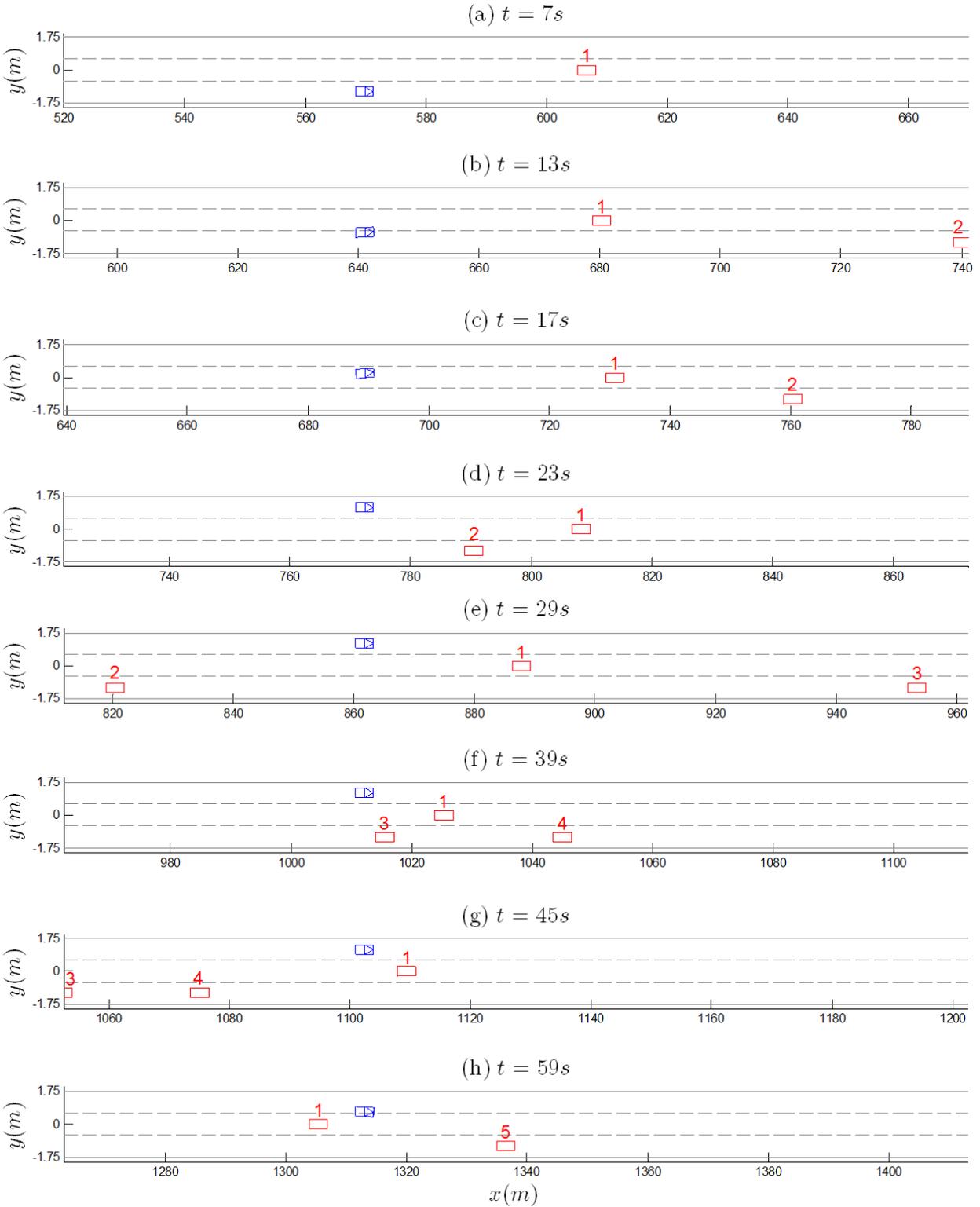


FIGURE 3.20 – Scène de trafic à différents instants du scénario de test représentant l'évolution de l'ego-véhicule au sein d'une situation de trafic aléatoire

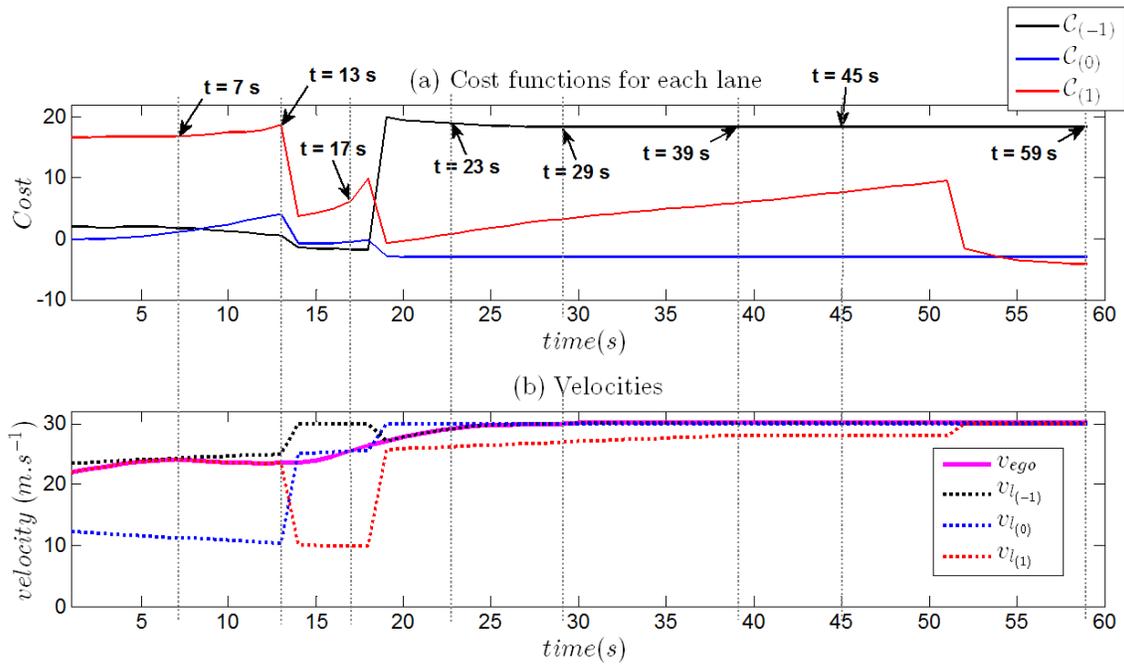


FIGURE 3.21 – Évolution durant le scénario des : (a) fonctions de coût pour chaque voie ;
 (b) Vitesses de l'ego-véhicule et des véhicules leaders sur chaque voie

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modules de haut niveau de l'architecture. La notion de gestion d'autorité est centrale à la coopération Homme-Machine. Le choix du niveau d'automatisation (mode de fonctionnement) relève de l'attribution des tâches. Le système proposé offre un niveau d'automatisation modulable où le conducteur peut rester aux commandes du véhicule (Niveau 0), déléguer le contrôle longitudinal (Niveau 1) ou déléguer le contrôle longitudinal et latéral (Niveau 2). Les transitions entre les modes est une problématique à part entière qui retient l'attention de beaucoup de chercheurs. Suite à de nombreuses discussions au sein du consortium, la logique de fonctionnement du système ainsi que les transitions entre les niveaux d'automatisation ont été définies de sorte à assurer la conscience de la situation du conducteur et préserver sa sécurité. L'ensemble des recommandations ont permis de modéliser sous forme de machine à état finis le fonctionnement global du système. En se basant sur les principes de l'automatisation adaptative et du contrôle partagé nous avons proposé un principe d'affinement de la distribution d'autorité en temps réel en fonction de la situation afin d'adapter le fonctionnement des modules du système au niveau de la manœuvre, de la trajectoire et des contrôleurs en cas de conflit.

Pour coopérer au niveau de la manœuvre, le système a besoin d'inférer l'intention du conducteur. Une méthode de détection de l'intention basée sur la logique floue a été proposée. Celle-ci permet de distinguer trois manœuvres : Le maintien de voie et les changements de voie dans les deux directions droite/gauche.

Enfin, l'approche pour décider des manœuvres à exécuter par le système est présentée. Inspirée du modèle de la psychologie cognitive de Van Der Molen, celle-ci se base sur la génération de stratégies candidates en fonction de la situation, la prédiction de la situation pour chaque stratégie et une phase d'évaluation basée sur des fonctions de coût afin d'en déterminer la plus appropriée. L'intérêt de l'approche réside dans l'évaluation et le classement de plusieurs alternatives pour les confronter à l'intention du conducteur afin d'assurer une coopération au niveau de la manœuvre.

Chapitre 4

Fonctions de bas niveau pour la coopération

4.1 Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les développements des modules qui s'inscrivent dans le bas niveau de l'architecture de contrôle simplifiée représentée sur la figure 4.1.

Dans les architectures classiques de la robotique et de la conduite automatisée, le module de planification de trajectoire se compte parmi les fonctions de haut niveau à cause de l'horizon temporel relativement élevé de cette tâche. Cela dit, dans notre cas la planification de trajectoire requiert une fréquence d'exécution plus élevée car elle intègre une dimension coopérative pour le contrôle partagé qui change la nature de sa fonction. Enfin, l'approche utilisée pour le contrôle latéral partagé du véhicule est présentée.

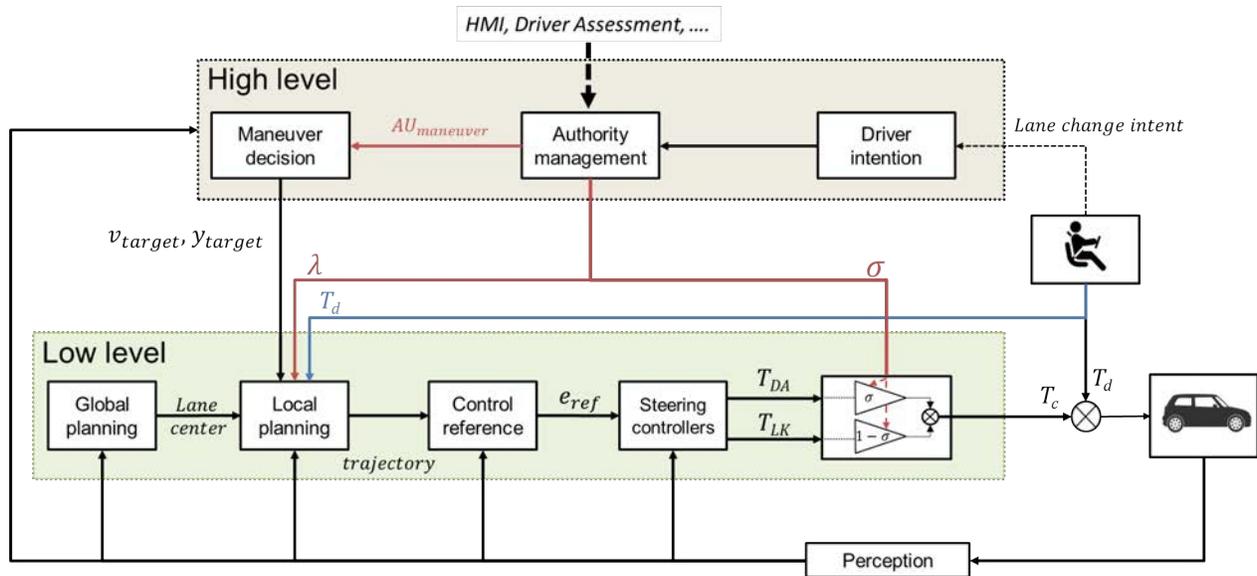


FIGURE 4.1 – Architecture de contrôle simplifiée : Fonctions de bas niveau pour la coopération Homme-machine (cadre vert)

4.2 Approche pour la planification de trajectoire coopérative

4.2.1 Introduction

Comme expliqué précédemment, les conflits entre le conducteur et le système de conduite automatisée sont des problèmes importants qui peuvent affecter la sécurité du conducteur et l'acceptabilité du système. Compte tenu de l'aspect hiérarchique de la tâche de conduite la source du conflit peut être à des niveaux plus hauts et se répercute sur le niveau de contrôle ce qui résulte en des interférences négatives entre les efforts du conducteur et ceux produits par le système. Par ailleurs, ces nuisances peuvent être imputées à une incohérence entre la trajectoire planifiée par le système et celle que le conducteur attend. Cette section présente une approche de planification de trajectoire permettant de tenir compte de l'action du conducteur lui donnant ainsi la possibilité d'intervenir sur la trajectoire planifiée par le système. Ainsi, le système est capable à tout moment de scruter l'activité du conducteur et en cas de conflit de replanifier une trajectoire plus adaptée pour résoudre ou atténuer le conflit. L'idée de base est donc de prendre en compte les actions du conducteur sur le volant au niveau de la planification de trajectoire afin d'ajuster la trajectoire souhaitée du système d'une manière qui correspond mieux aux attentes du conducteur. Ce faisant, le système tendrait vers la position visée par le conducteur, l'aidant ainsi à faire des écarts dans

la voie avec un effort réduit tout en atténuant les conflits. Par conséquent, en plus de son rôle classique qui est de générer des trajectoires réalisables évitant toute collision, le module de planification de trajectoire se voit attribuer un rôle supplémentaire qui lui rajoute un caractère coopératif permettant ainsi d'adapter les trajectoires aux actions du conducteur.

4.2.2 État de l'art

Initialement un problème de la robotique, la planification de trajectoire a été traitée d'une manière intensive durant les deux dernières décennies. Selon l'application, de nombreuses approches existent dans la littérature.

Par ailleurs, ce problème peut être complexe notamment avec la nécessité de prendre en compte la dynamique du robot. Afin de le simplifier et d'intégrer efficacement la dynamique, des approches de planification de trajectoires dites hiérarchiques ont été utilisées. À titre d'exemple, une combinaison de planification discrète haut niveau et de planification de mouvement basée sur la discrétisation est présentée dans [224] et [225]. Comparé aux applications robotiques où l'environnement est ouvert, le véhicule automatisé évolue sur les routes. Ces environnements sans doute moins complexes car ils sont considérés comme des environnements structurés. Néanmoins, cet environnement hautement dynamique nécessite une replanification rapide pour tenir compte de l'évolution de la situation. Par conséquent, l'idée de la planification hiérarchique a été adaptée aux autoroutes dans de nombreuses études. Wei et al. dans [218][219] utilisait une architecture de planification à trois niveaux divisée en une planification globale (stratégique), comportementale (tactique) et de trajectoire (locale). Des idées similaires peuvent être trouvées dans [156][226][227][218][219][228].

Cette méthode combine une planification globale qui donne une description géométrique de la route suivie avec une couche comportementale qui détermine la manoeuvre appropriée pour évoluer au sein de l'environnement dynamique et enfin un planificateur de bas niveau aussi appelé planificateur local qui détermine la trajectoire optimale à suivre par le véhicule automatisé.

Dans un premier temps, la planification du comportement permet de déterminer une action appropriée dans un ensemble fini de manoeuvres. Par exemple, les auteurs dans [156] construisent une grille intuitive de manoeuvres en combinant des actions élémentaires réparties selon l'axe longitudinal (rester dans la même plage de vitesse, décélérer ou accélérer) et l'axe latéral (rester dans la même voie, changer de voie à gauche, ou changer de voie à droite) en plus d'une manoeuvre d'urgence. Bien que la majeure partie des travaux dans la littérature se concentre sur la conduite sur autoroute, l'ensemble des manoeuvres possibles peut être étendu à d'autres situations de conduite telles que la conduite urbaine pour gérer d'autres situations comme la traversée de piétons, les intersections et les ronds-points [229]. En écar-

tant les manœuvres les moins pertinentes face à la situation rencontrée, la recherche de la trajectoire est limitée aux manœuvres retenues. Dans notre cas, cette couche est représentée par le module de prise décision présenté précédemment.

La couche comportementale est couplée à une planification de trajectoire de bas niveau qui recherche une solution pour les manœuvres sélectionnées précédemment en tenant compte de la dynamique du véhicule. A ce niveau, diverses méthodes bien connues peuvent être employées pour générer une trajectoire réalisable par le véhicule. Les méthodes de champs potentiels ont notamment été étudiées de manière intensive (voir par exemple [158][230]). Suite à la discrétisation de l'environnement, ce problème peut être formalisé comme un problème de recherche dans un graphe ou un arbre notamment avec des algorithmes connus tels que A-étoile (A^*) et ses variantes [231] et Dijkstra [232]. Dans [217][233] le problème de planification de trajectoire est formulé comme un problème de commande optimale à l'aide de l'approche MPC. Des approches basées sur l'interpolation ont également été largement employées pour le calcul géométrique des trajectoires. Les premiers travaux ont mis en oeuvre des droites et des arcs de cercle [234]. Afin d'assurer la continuité des courbures et respecter la dynamique du véhicule d'autres formes ont été utilisées. Les clothoïdes ont été utilisées pour la conception du réseau routier mais également pour la planification de trajectoires [235]. Les courbes paramétriques telles que les courbes de Bézier sont utilisées dans [236]. Les trajectoires polynomiales restent parmi les formes les plus utilisées dans le domaine automobile [237][238][156][226].

Les principaux avantages d'une telle séparation hiérarchique de l'algorithme de planification de trajectoire résident dans l'efficacité de calcul et la simplicité de l'implémentation [224]. En outre, elle offre une interaction de haut niveau avec le conducteur en communiquant un ensemble fini de manœuvres qui sont considérées comme plus naturelles et compréhensibles par les humains [156] ce qui correspond à notre besoin de coopération multi-niveau. De plus, la méthode a l'avantage de fournir à la fois des comportements réactifs et proactifs en offrant une réponse rapide à l'environnement qui évolue et donne au système la capacité d'effectuer des manœuvres jouissant d'une certaine anticipation [229].

Par ailleurs, une exigence importante de l'application dans notre cas est la fréquence élevée de replanification. En effet, il est crucial de tenir compte rapidement des variations du couple appliqué par le conducteur sur le volant pour obtenir une bonne interaction haptique et éviter un temps de réponse long des trajectoires planifiées car cela pourrait conduire à des confusions et avoir un effet inverse à celui souhaité sur la résolution des interférences négatives. Ceci écarte donc les approches gourmandes en temps de calcul telles que les méthodes basés sur l'optimisation. Les performances de la planification hiérarchique ont été démontrées dans des applications temps réel notamment dans [226] et [156]. Cependant, il est important de

concevoir les niveaux de planification de manière synergique afin que le planificateur de bas niveau puisse trouver des solutions réalisables selon le plan de haut niveau [224][225]. De plus, l’algorithme devrait fournir une trajectoire à risque minimal pour arrêter le véhicule en toute sécurité dans le cas où aucune trajectoire réalisable ne serait trouvée [156][217][227].

L’algorithme que nous avons employé pour la planification locale est inspiré des travaux présentés dans [156] et [226]. Ces derniers se basent sur une exploration de trajectoires polynomiales qui sont par la suite évaluées sur la base d’une fonction de coût. Cette approche allie l’aspect de discrétisation de trajectoires tirée des méthodes de recherche dans les graphes et les arbres à l’évaluation sur la base d’une fonction de coût tirée des méthodes d’optimisation pour offrir un cadre flexible et efficace pour la planification rapide de trajectoire que nous exploitons pour notre approche de planification coopérative.

4.2.3 Approche de planification de la trajectoire

Rappelons la figure 4.1 qui présente l’architecture de contrôle simplifiée. Celle-ci illustre l’interaction entre le haut niveau représenté par le module de décision sur la manœuvre et le module de gestion de l’autorité avec la planification de trajectoire ainsi que l’étage de contrôle.

Le module de planification de trajectoire fournit des trajectoires locales pour guider le véhicule dans la voie (maintien de voie) ou pour exécuter des manœuvres de changement de voie.

La décision sur la manœuvre s’effectue au niveau tactique. Que ce soit les changements de voies préconisés par le système ou suivant les demandes validées du conducteur, ce niveau alimente le planificateur de trajectoire avec des informations permettant de calculer la trajectoire notamment la position du centre de voie désiré y_{target} et la vitesse souhaitée v_{target} . De plus, le couple appliqué par le conducteur sur le volant T_d est également utilisé dans le module de planification afin de réajuster la trajectoire planifiée pour essayer de traiter les conflits en amont du contrôleur. Ce dernier se contente de simplement calculer le couple de braquage T_c nécessaire au suivi des trajectoires planifiées. Compte tenu de l’importance de la gestion d’autorité lorsque des conflits apparaissent, la variable λ est introduite afin de modéliser l’autorité du conducteur sur la modification de la trajectoire planifiée par le système. Elle permet d’empêcher des actions involontaires ou dangereuses notamment lorsqu’il est distrait ou hypo-vigilant.

La planification globale (figure 4.1) fournit un ensemble discret de points de passage qui décrivent les caractéristiques de la route que va suivre l’ego-véhicule. Elle s’appuie sur une cartographie du trajet généralement connue car définie hors-ligne. Dans des travaux tels que [236][239], ne traitant pas les obstacles dynamiques, l’accent est mis sur la génération de

trajectoires lisses et continues à partir des informations de la planification globale. L'objectif étant de permettre une progression le long de la route tout en minimisant la courbure afin de garantir un certain confort. Dans notre cas, seule la cartographie est utilisée car nous supposons que le réseau routier est déjà optimisé et assure des courbures continues du moment que les formes élémentaires de profil de route sont respectées (droites, clothoïdes et sections circulaires) et garantit la sécurité si les limitations de vitesse sont respectées. Par conséquent, la planification locale se base sur cette description de la route afin de calculer des trajectoires spatio-temporelles lisses qui prennent en considération l'environnement dynamique de l'ego-véhicule.

Par ailleurs, afin de simplifier le problème de planification, nous exploitons l'idée présentée dans [226] qui suggère que l'humain se base sur la route lorsqu'il planifie le mouvement latéral du véhicule. De ce fait, il est intéressant de calculer les trajectoires dans le repère de Frenet correspondant au repère de la route et d'effectuer une transformation afin de l'exprimer dans le repère cartésien global.

La figure 4.2 illustre une trajectoire d'un objet exprimée dans le repère de Frenet défini le long de la courbe que dessine le centre de la voie. Ce dernier est un repère mobile dont les axes \vec{x}_R et \vec{y}_R sont respectivement tangent et normal au centre de la voie.

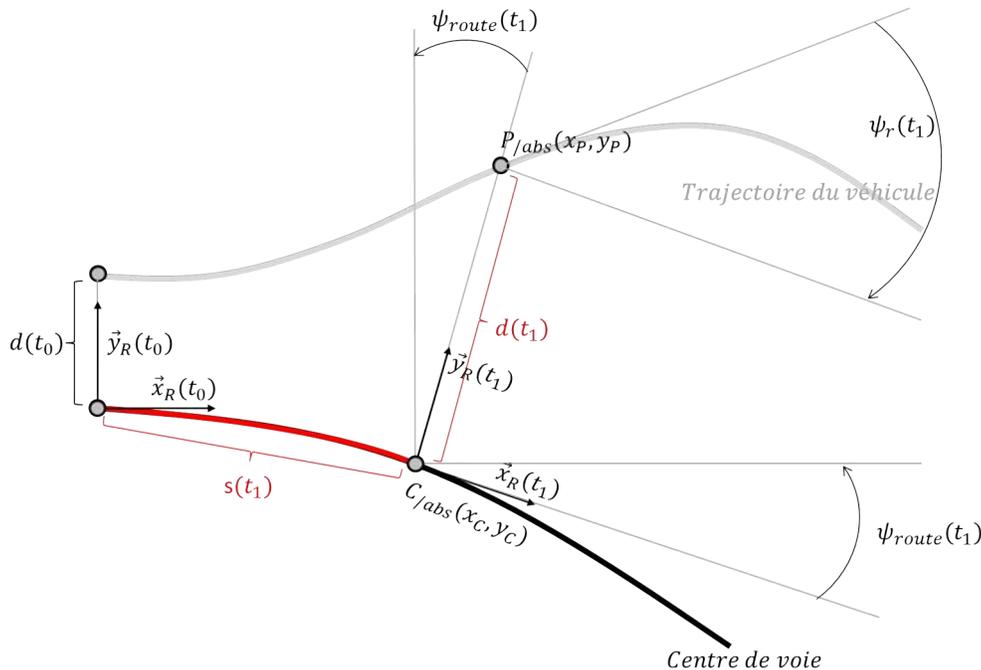


FIGURE 4.2 – Représentation d'une trajectoire dans le repère de Frenet

La trajectoire de l'objet s'exprime par rapport à la courbe du centre de la voie. Ainsi, les coordonnées du point P appartenant à la trajectoire s'expriment dans le repère Route à tout

instant t sous la forme : $P(t)_{/route}(s(t), d(t))$.

$s(t)$ représente l'abscisse curviligne de l'objet. Celle-ci correspond à la distance parcourue par l'objet au niveau de la courbe du centre de la voie depuis l'origine (voir la figure 4.2). $d(t)$ dénote l'écart du point de la trajectoire par rapport à la courbe du centre de la voie. Celle-ci représente la distance euclidienne que sépare le point $P(t)$ et le point $C(t)$, son projeté orthogonal au niveau de la courbe de référence. Elle s'obtient en fonction des coordonnées des points $P(t)$ et $C(t)$ dans le repère absolu comme suit :

$$d(t) = \sqrt{(x_P(t) - x_C(t))^2 + (y_P(t) - y_C(t))^2} \quad (4.1)$$

En considérant l'angle de cap de la route ψ_{route} , les coordonnées d'un point $P(t)$ de la trajectoire s'expriment dans le repère absolu comme suit :

$$\begin{aligned} x_P(t) &= x_C(t) - d(t) \cdot \sin(\psi_{route}(t)) \\ y_P(t) &= y_C(t) + d(t) \cdot \cos(\psi_{route}(t)) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$\psi_r(t)$ représente l'angle entre la tangente de la trajectoire et celle du centre de la voie. Par conséquent, le cap de la trajectoire dans le repère absolu $\psi_{r/abs}(t)$ est donné par :

$$\psi_{r/abs}(t) = \psi_r(t) + \psi_{route}(t) \quad (4.3)$$

La figure 4.3 illustre la transformation d'une trajectoire de changement de voie du repère Route vers le repère global.

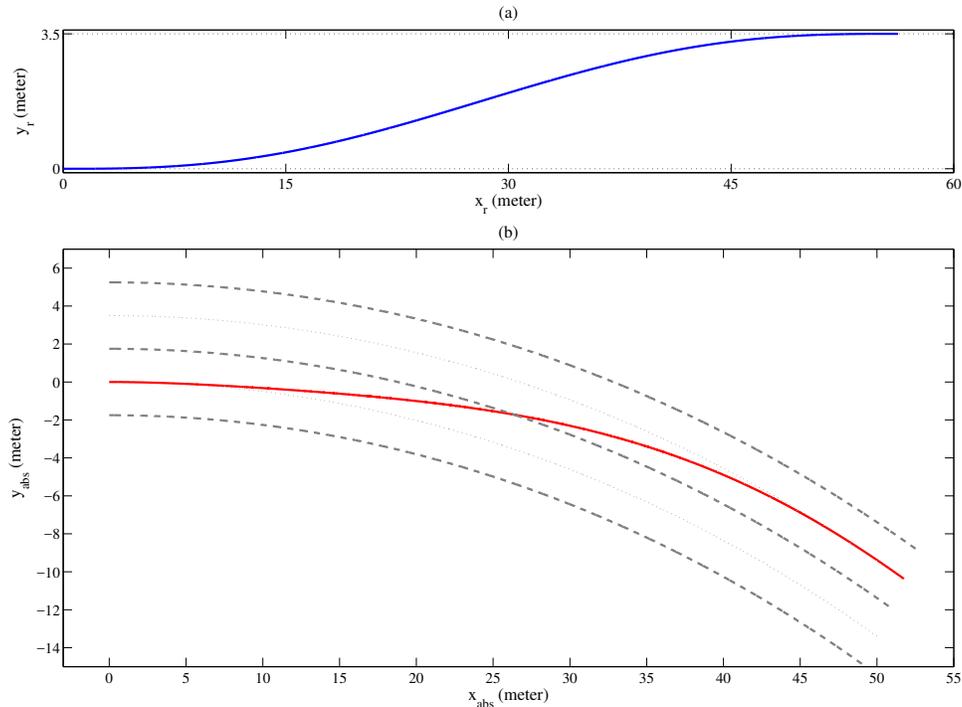


FIGURE 4.3 – Transformation de la trajectoire du repère Route vers le repère global

4.2.3.1 Les fonctions polynomiales comme base pour la planification de trajectoire sur autoroute

Les primitives de trajectoires polynomiales ont été largement utilisées pour la planification locale dans des environnements structurés tels que les autoroutes. Il a été montré dans [237] que les polynômes de cinquième ordre appartiennent à la classe des fonctions qui contraignent le jerk (dérivée de l'accélération), grandeur qui est liée au confort de la trajectoire. Des polynômes de cet ordre garantissent par la même occasion des trajectoires optimales vis à vis du jerk. D'une manière générale, les polynômes d'ordre élevé (3ème ordre et plus) fournissent des trajectoires assurant des vitesses, des accélérations et des courbures continues. Par ailleurs, ils permettent une formulation simple du problème de planification qui se présente comme un problème de condition aux limites et qui répond à la question de trouver une trajectoire lisse qui guide le véhicule d'un état initial à un état final [238] comme le montre la figure 4.4. Cette technique permet de calculer séparément des trajectoires pour le déplacement latéral et longitudinal du véhicule. Elle est particulièrement intéressante pour calculer les trajectoires dans le repère route.

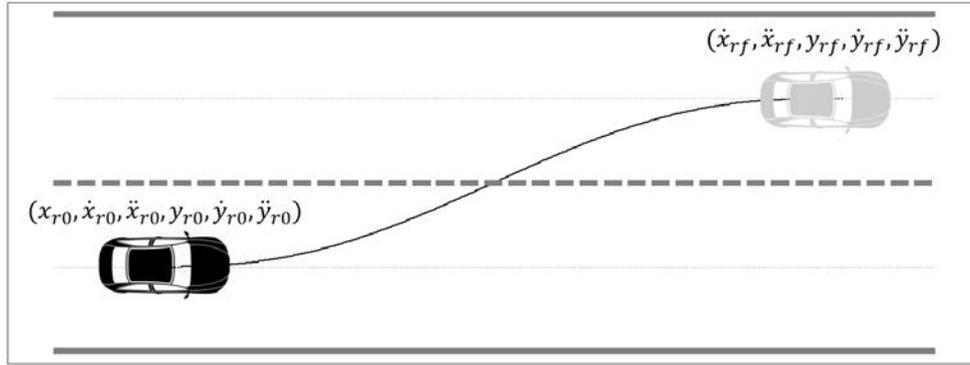


FIGURE 4.4 – Illustration du calcul d'une trajectoire polynomiale

Pour le mouvement latéral, l'état initial comprend la position, la vitesse et l'accélération latérales dans le repère Route à l'instant actuel $[y_{r0}, \dot{y}_{r0}, \ddot{y}_{r0}]$. Afin de définir les conditions finales du déplacement latéral nous faisons l'hypothèse que l'objectif du véhicule est d'évoluer parallèlement à la route et donc qu'il atteigne la position cible finale avec une vitesse et une accélération latérale nulle. Par conséquent l'état final de la trajectoire latérale est donné par : $[y_{rf}, 0, 0, T_y]$, soit y_{rf} la position latérale cible et T_y le temps d'accomplissement de la trajectoire i.e la durée pour rejoindre l'état final. Grâce aux six conditions aux limites, il est possible de définir un polynôme du 5ème degré décrivant le mouvement latéral à effectuer sous la forme :

$$\begin{cases} y_r(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 \\ \dot{y}_r(t) = b_1 + 2b_2 t + 3b_3 t^2 + 4b_4 t^3 + 5b_5 t^4 \\ \ddot{y}_r(t) = 2b_2 + 6b_3 t + 12b_4 t^2 + 20b_5 t^3 \end{cases} \quad (4.4)$$

Quant au mouvement longitudinal, étant donné que la position longitudinale cible finale n'est pas connue, cinq conditions aux limites permettent de définir un polynôme de quatrième ordre décrivant le mouvement longitudinal du véhicule qui l'emmène de l'état initial $[x_{r0}, \dot{x}_{r0}, \ddot{x}_{r0}]$ vers l'état final $[\dot{x}_{rf}, 0, T_x]$ avec \dot{x}_{rf} la vitesse cible finale et T_x temps d'accomplissement de la trajectoire longitudinale. La trajectoire longitudinale est exprimée par :

$$\begin{cases} x_r(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \\ \dot{x}_r(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 \\ \ddot{x}_r(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 \end{cases} \quad (4.5)$$

Les coefficients des polynômes sont trivialement dérivés suite à la résolution des systèmes

d'équations suivants :

$$\begin{aligned} [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]^\top &= \mathbf{A} [x_{r0} \ \dot{x}_{r0} \ \ddot{x}_{r0} \ \dot{x}_{rf} \ \ddot{x}_{rf}]^\top \\ [b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5]^\top &= \mathbf{B} [y_{r0} \ \dot{y}_{r0} \ \ddot{y}_{r0} \ y_{rf} \ \dot{y}_{rf} \ \ddot{y}_{rf}]^\top \end{aligned} \quad (4.6)$$

où les matrices \mathbf{A} et \mathbf{B} sont des fonctions du temps d'accomplissement des trajectoires et sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2T_x & 3T_x^2 & 4T_x^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6T_x & 12T_x^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_y & T_y^2 & T_y^3 & T_y^4 & T_y^5 \\ 0 & 1 & 2T_y & 3T_y^2 & 4T_y^3 & 5T_y^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6T_y & 12T_y^2 & 20T_y^3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Par ailleurs, l'angle de cap de la trajectoire $\psi_r(t)$ (angle que forme la tangente de la trajectoire avec le centre de la voie) est obtenu par la formule suivante :

$$\psi_r(t) = \arctan\left(\frac{\dot{y}_r(t)}{\dot{x}_r(t)}\right) \quad (4.8)$$

4.2.3.2 Génération d'un ensemble de trajectoires candidates

A partir des équations (4.6) et (4.7) il devient clair qu'une trajectoire polynomiale est entièrement définie lorsque les conditions initiales et finales et les temps d'accomplissements T_x et T_y sont connus.

En jouant sur ces variables, il est possible de construire l'ensemble de trajectoires dans lequel on va choisir celle qui sera exécutée par l'égo-véhicule. A chaque cycle de replanification T_{cycle} , un nouvel ensemble de trajectoires est généré. Afin d'assurer la continuité des trajectoires, l'ensemble des trajectoires construites partagent le même état initial. Ce dernier est choisi à partir de la trajectoire calculée dans le cycle précédent.

En mettant le suffixe ($*_{prev}$) pour référer à la trajectoire calculée au cycle précédent, les

conditions aux limites pour le mouvement latéral s'expriment sous la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{r_0} = y_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ \dot{y}_{r_0} = \dot{y}_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ \ddot{y}_{r_0} = \ddot{y}_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ y_{r_f} = y_{target} \\ \dot{y}_{r_f} = 0 \\ \ddot{y}_{r_f} = 0 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

Ainsi, il est possible d'obtenir un ensemble de trajectoires candidates pour le mouvement latéral du véhicule en discrétisant la position cible finale y_{target} et le temps d'accomplissement de la trajectoire T_y .

En ce qui concerne la trajectoire du mouvement longitudinal les conditions aux limites sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{r_0} = x_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ \dot{x}_{r_0} = \dot{x}_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ \ddot{x}_{r_0} = \ddot{x}_{r_{prev}}(T_{cycle}) \\ \dot{x}_{r_f} = v_{target} \\ \ddot{x}_{r_f} = 0 \end{array} \right. \quad (4.10)$$

De la même manière, la discrétisation de la vitesse cible finale v_{target} et du temps d'accomplissement T_x permet de construire un ensemble de trajectoires longitudinales à évaluer.

L'ensemble de trajectoires est construit autour de la position latérale du centre de la voie cible y_{target} et de la vitesse de référence v_{target} déterminés par le module de décision de la manoeuvre comme suit :

$$\dot{x}_{r_{f,i}} = v_{target} + a_i \cdot \delta T, \quad a_i \in [-a_{lim}, +a_{lim}] \quad (4.11)$$

$$y_{r_{f,j}} = y_{target} + \Delta y_j, \quad \Delta y_j \in [-\Delta y_{lim}, +\Delta y_{lim}] \quad (4.12)$$

$$T_{x,k} = k \cdot \Delta T, \quad k = 1, \dots, M \quad (4.13)$$

$$T_{y,k} = k \cdot \Delta T, \quad k = 1, \dots, M \quad (4.14)$$

a_i correspond à une accélération à appliquer sur un intervalle de temps δT afin de varier la vitesse finale autour de la vitesse cible v_{target} .

Δy_j correspond à une déviation par rapport au centre de la voie cible. Nous faisons consciemment la distinction entre le niveau tactique dans lequel se décide la manoeuvre et donc la voie cible (y_{target}) et des écarts effectués au sein d'une même voie qui sont

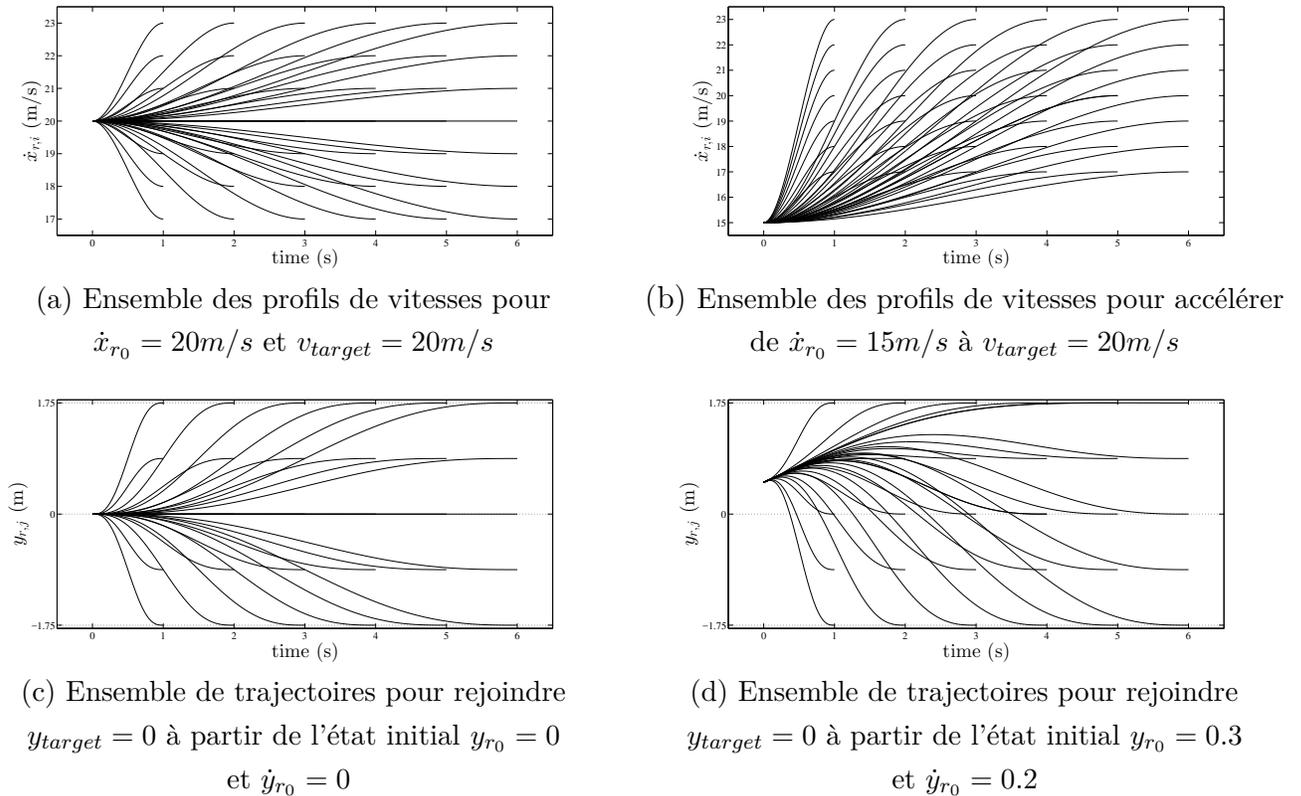


FIGURE 4.5 – Génération d'un ensemble de trajectoires en variant les conditions aux limites

associés au niveau opérationnel. Par conséquent, les écarts Δy_j sont limités à l'intervalle $[-\Delta y_{lim}, +\Delta y_{lim}]$ où $\Delta y_{lim} < W/2$ et W qui dénote la largeur de la voie (figure 4.5(c) et (d)).

Ainsi, $\dot{x}_{r_{f,i}}$ (respect. $y_{r_{f,j}}$) est l'ensemble de vitesses finales (respect. positions latérales finales) qui sera considéré pour construire les trajectoires longitudinales (respect. latérales). $T_{x,k}$ et $T_{y,k}$ représentent l'ensemble des temps d'accomplissements des trajectoires longitudinales et latérales respectivement. Ils se constituent de multiples du pas de temps ΔT où M est lié au temps maximal considéré. Enfin, l'ensemble des trajectoires découle de la combinaison de $\dot{x}_{r_{f,i}}$ avec $T_{x,k}$ pour le mouvement longitudinal et de $y_{r_{f,j}}$ avec $T_{y,k}$ pour le mouvement latéral.

La figure 4.5 illustre le processus de génération des trajectoires. Les figures 4.5(a) et (b) montrent deux ensembles de profils de vitesses longitudinales calculés avec des conditions aux limites différentes. D'autre part, les figures 4.5(c) et (d) donnent un exemple de trajectoires candidates pour rejoindre le centre de la voie associée à $y_{target} = 0$ avec des conditions de départ différentes.

Par ailleurs, outre la continuité des trajectoires planifiées, le choix de l'état initial à

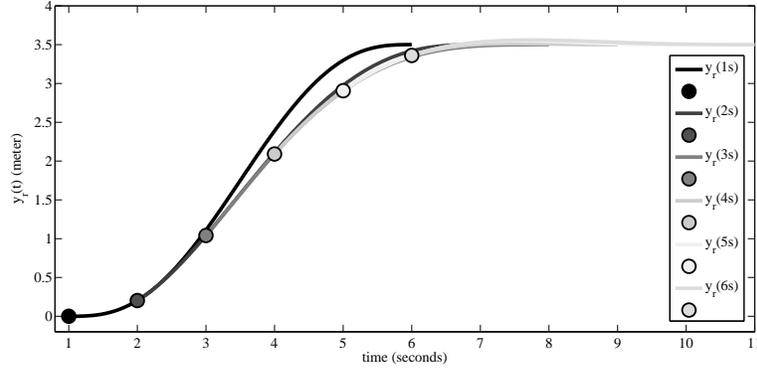
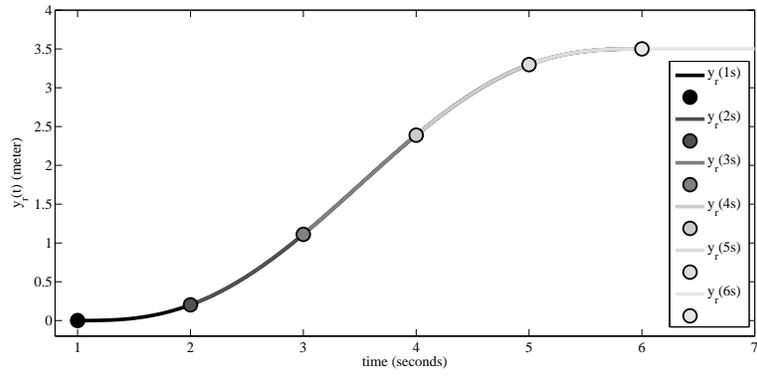

 (a) Incohérence temporelle due à un choix inadéquat de ΔT et T_{cycle}

 (b) Cohérence temporelle lors de la replanification de la trajectoire ($\Delta T = T_{cycle}$)

FIGURE 4.6 – Cohérence temporelle lors de la planification cyclique de trajectoire

chaque cycle de replanification à partir de la trajectoire optimale précédemment calculée sert un autre objectif qui est d'assurer une cohérence temporelle à chaque cycle de replanification. Celle-ci telle que définie dans Werling et al. [226] se traduit par le fait que la trajectoire optimale à chaque cycle coïncide avec celle précédemment calculée lorsque les conditions finales sont inchangées (figure 4.6(b)). En effet, lorsque la condition de cohérence temporelle n'est pas remplie, les trajectoires planifiées peuvent engendrer des oscillation et des dépassements ((figure 4.6(a))).

Face à cela, le choix du temps de cycle de replanification T_{cycle} et celui du temps d'accomplissement minimal ΔT (se référer à l'eq. 4.13) joue un rôle crucial. En effet, la cohérence temporelle est obtenue lorsque le cycle de replanification est un multiple du temps minimum d'accomplissement considéré et doit être choisi en respect de l'équation suivante :

$$\Delta T = \frac{T_{cycle}}{N}, \quad N \in \mathbb{N}^* \quad \text{et} \quad N \leq M \quad (4.15)$$

Avec N un nombre naturel non nul et M qui est défini dans l'équation 4.13. Ce résultat est justifié par l'unicité du polynôme qui relie l'état initial et l'état final pour un temps d'accomplissement donné. Cela revient à dire que la trajectoire polynomiale qui aura pour état initial $[y_{r_{prev}}(t_0) \dot{y}_{r_{prev}}(t_0) \ddot{y}_{r_{prev}}(t_0)]$ coïncidera parfaitement avec le restant de la trajectoire précédemment calculée $y_{r_{prev}}(t)$ pour le temps d'accomplissement : $T_y = T_{y_{prev}} - t_0$.

Enfin, la figure 4.6 montre un exemple de cette notion de cohérence temporelle. Sur la figure 4.6(a) un choix inadéquat de T_{cycle} et ΔT fait que la trajectoire à chaque instant de replanification ne coïncide pas avec la trajectoire calculée au cycle précédent. D'autre part, la figure 4.6(b) montre qu'à chaque cycle de replanification, la nouvelle trajectoire est dans la continuité de celle précédemment calculée.

4.2.3.3 Évaluation des trajectoires

Une fois le processus de génération des trajectoires expliqué nous nous penchons sur leur évaluation et le choix de celles qui seront exécutées par l'ego-véhicule. Cette étape s'effectue en deux temps.

Première phase d'évaluation

Une première phase se caractérise par l'évaluation rapide des trajectoires latérales et longitudinales séparément. En effet, nous proposons de tirer profit de l'expression analytique des trajectoires afin de les évaluer sans les échantillonner car calculer explicitement les points les constituant s'avère assez coûteux en temps de calcul. Cette étape permet donc de rapidement classer les trajectoires dans chaque ensemble selon un nombre de critères qui se rapportent au confort, le temps d'exécution de la manoeuvre et enfin la position désirée du conducteur lorsqu'il veut s'écarter de la trajectoire planifiée.

A cet effet, nous définissons les fonctions de coût suivantes :

$$\mathbf{C}_{x_{i,k}} = w_{J,x} \mathbf{J}_{\mathbf{x}_{i,k}} + w_{t,x} T_{x,k} + w_v (\dot{x}_{r_{f,i}} - v_{target})^2 \quad (4.16)$$

$$\mathbf{C}_{y_{j,k}} = w_{J,y} \mathbf{J}_{\mathbf{y}_{j,k}} + w_{t,y} T_{y,k} + w_y (y_{r_{f,j}} - y_{target})^2 + \lambda w_d |y_{r_{f,j}} - y_{des}| \quad (4.17)$$

Où \mathbf{C}_x et \mathbf{C}_y représentent les fonctions de coût des mouvements longitudinal et latéral respectivement. Ces dernières regroupent plusieurs termes pondérés avec les poids $w_{J,x}, w_{J,y}, w_{t,x}, w_{t,y}, w_v, w_y, w_d$ qui permettent d'opposer plusieurs critères et de paramétrer ainsi le type de trajectoires planifiées. Les indices i, j, k réfèrent à ceux définis dans les équations (4.11) (4.12) (4.13) (4.14).

Souvent utilisé pour caractériser le confort d'un mouvement, le jerk représente la vitesse avec laquelle l'accélération et donc la force que subit le passager varie. Les termes $\mathbf{J}_{\mathbf{x}_{i,k}}$ et

$\mathbf{J}_{y_j,k}$ introduisent cette notion de confort dans l'évaluation des trajectoires candidates et représentent l'intégrale du carré du jerk sur la durée d'exécution de la trajectoire. Ils sont exprimés selon :

$$\mathbf{J}_{x_i,k} = \int_0^{T_{x,k}} \ddot{x}_{i,k}^2(\tau) d\tau, \quad \mathbf{J}_{y_j,k} = \int_0^{T_{y,k}} \ddot{y}_{j,k}^2(\tau) d\tau \quad (4.18)$$

Les indices i, j, k indiquent que les trajectoires $x_{i,k}$ et $y_{j,k}$ sont issues de la combinaison des ensembles de conditions finales $\dot{x}_{r_f,i}, y_{r_f,j}, T_{x,k}$ et $T_{y,k}$ (eq. 4.11 à 4.14).

Grâce à la formulation polynomiale des trajectoires, ces termes liés au jerk s'expriment analytiquement en fonction des coefficients du polynôme et des temps d'accomplissement comme suit :

$$\mathbf{J}_{x_i,k} = 36 T_{x,k} (a_{3_i,k}^2 + 4 a_{3_i,k} a_{4_i,k} T_{x,k} + \frac{16}{3} a_{4_i,k}^2 T_{x,k}^2) \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{y_j,k} = 36 T_{y,k} [& b_{3_j,k}^2 + 4 b_{3_j,k} b_{4_j,k} T_{y,k} + (\frac{16}{3} b_{4_j,k}^2 + \frac{20}{3} b_{3_j,k} b_{5_j,k}) T_{y,k}^2 \\ & \dots + 20 b_{4_j,k} b_{5_j,k} T_{y,k}^3 + 20 b_{5_j,k}^2 T_{y,k}^4] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Les seconds termes dans les équations (4.16) et (4.17) ont pour but de pénaliser les trajectoires dont le temps d'accomplissement est trop long. Les troisièmes termes pénalisent les trajectoires dont la vitesse finale \dot{x}_{r_f} (respect. position latérale finale y_{r_f}) s'écarte de la vitesse cible v_{target} (respect. y_{target}).

Le dernier terme dans la fonction de coût du mouvement latéral (eq. 4.17) renvoie au terme de l'action conducteur. L'idée est d'opposer un terme pénalisant l'écart relatif à une position désirée par le conducteur désignée par y_{des} au terme initial qui encourage le suivi de y_{target} . De plus, deux raisons ont motivé le choix de la norme 1 pour ce terme. Premièrement, le besoin de cibler précisément vers la position désirée par le conducteur est mieux représenté par la norme 1 lorsque l'on a des petites déviations autour de y_{des} comparé à des normes d'ordre supérieur. Deuxièmement, dans les situations où l'écart désiré par le conducteur est important par rapport au centre de la voie (y_{target}) il est souhaitable pour notre application de ne pas trop s'en éloigner afin de garder le véhicule dans la voie cible. Cela est illustré dans la figure 4.7.

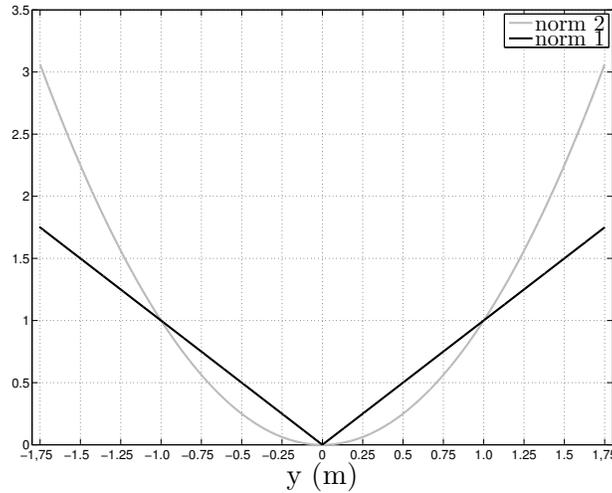


FIGURE 4.7 – Comparaison des normes 1 et 2 en illustrant le comportement pour des petites déviations et celle pour des grandes déviations

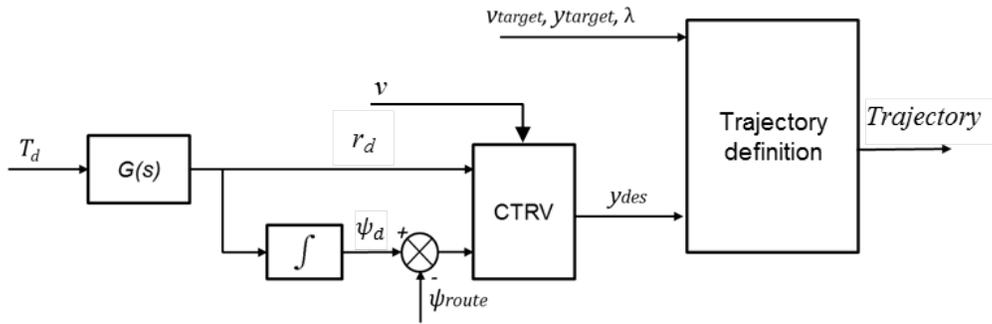


FIGURE 4.8 – Vue détaillée du bloc de planification locale

La variable λ variant dans l'intervalle $[0, 1]$ est liée à la variable AU_{Traj} résultat de la gestion de l'autorité du conducteur au niveau de la trajectoire (se référer à l'équation 3.1).

Pour finir, dans ce paragraphe nous expliquons la démarche permettant de déterminer la position désirée par le conducteur y_{des} . Ainsi, afin d'ajuster la trajectoire planifiée à l'action du conducteur nous nous servons de la prédiction de l'écart latéral qu'il souhaite effectuer.

Cet écart est difficile à prédire sur la seule base de l'angle au volant tel qu'utilisé dans [158] vu que l'angle mesuré résulte de la somme des couples du conducteur et du système. Pour pallier à ce problème nous proposons d'isoler d'abord l'influence du conducteur sur la dynamique du véhicule et de prédire la trajectoire que le véhicule aurait réalisée s'il n'y avait que le couple du conducteur au niveau du volant.

Pour ce faire, nous utilisons la mesure du couple du conducteur sur le volant. Cette infor-

mation est disponible grâce à un couple-mètre installé au niveau de la colonne de direction. Pour bien illustrer cela la figure 4.8 expose plus en détail la structure du bloc de planification locale.

En utilisant une fonction de transfert $G(s)$, la vitesse de lacet r_d qui aurait été produite par le couple du conducteur uniquement est obtenue. La fonction de transfert est basée sur le modèle bicyclette augmenté avec le modèle de colonne de direction qui sera détaillé dans la section suivante.

La vitesse de lacet déduite est ensuite utilisée avec la vitesse du véhicule comme entrée d'un modèle cinématique du véhicule pour prédire le déplacement latéral sur un horizon temporel. Ici, nous utilisons le modèle CTRV (CTRV : Constant Turn Rate and Velocity) largement utilisé pour des applications de prédiction et de tracking [240][241]. Tel que représenté sur la figure 4.9, ce modèle suppose un cas stationnaire où le véhicule effectue un mouvement circulaire avec une amplitude constante de la vitesse longitudinale v et une vitesse de lacet r également constante sur un horizon temporel. Les trois autres variables d'état décrivant le véhicule sont les coordonnées du centre du véhicule x_g, y_g et l'angle de lacet ψ . En définissant le vecteur d'état $X(t) = [x_g(t) \ y_g(t) \ \psi(t) \ v(t) \ r(t)]$ les équations d'évolution du modèle sont les suivantes :

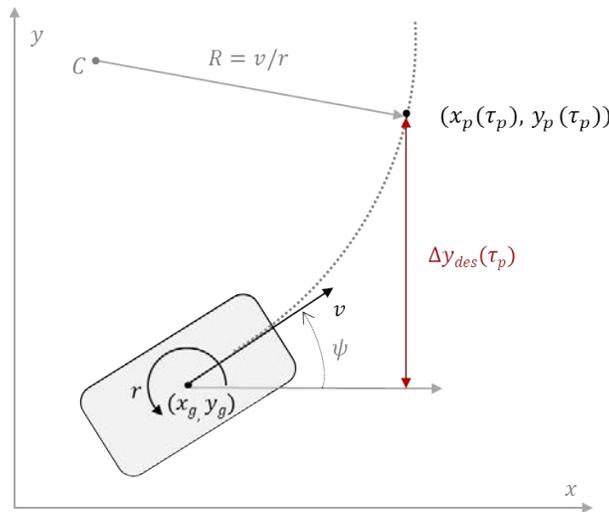


FIGURE 4.9 – Prédiction du déplacement latéral sur un horizon τ_p en utilisant le modèle cinématique CTRV

$$X(t + \tau_p) = \begin{cases} x_g(t) + \mu(t)[\sin(\psi(t) + r(t)\tau_p) - \sin(\psi(t))] \\ y_g(t) + \mu(t)[- \cos(\psi(t) + r(t)\tau_p) + \sin(\psi(t))] \\ \psi(t) + r(t)\tau_p \\ v \\ r \end{cases} \quad (4.21)$$

où : $\mu(t) = v/r$. La valeur de l'horizon de prédiction τ_p est importante pour l'efficacité de l'approche. D'une part, un horizon de prédiction trop petit conduit à une trajectoire prédite très proche de la trajectoire actuelle ce qui ne serait pas utile pour adapter la trajectoire planifiée. D'autre part, un horizon trop grand entraînerait des dépassements dans la trajectoire prédite et une instabilité dans les trajectoires planifiées car l'algorithme deviendrait trop sensible au couple du conducteur. Enfin, le choix de l'horizon de prédiction a été fait expérimentalement pour obtenir un bon ressenti de conduite et a été réglé sur $\tau_p = 1s$. A partir du déplacement latéral prédit $\Delta y_{des}(\tau_p)$ (figure 4.9), la position latérale désirée du conducteur est donnée par :

$$y_{des} = y_g + \Delta y_{des}(\tau_p) \quad (4.22)$$

La figure 4.10 illustre le résultat de la méthode de prédiction pour un déplacement latéral de $1.75m$. Le couple conducteur est illustré dans fig. 4.10(a). Fig. 4.10(b) oppose la mesure réelle de la vitesse de lacet produite sur le véhicule r (en bleu) contre celle obtenue par la fonction de transfert r_d (en rouge). Enfin, sur fig. 4.10(c) sont tracées la trajectoire réelle effectuée par le véhicule (en bleu) et la trajectoire prédite y_{des} que nous obtenons avec la méthode de prédiction présentée (en rouge).

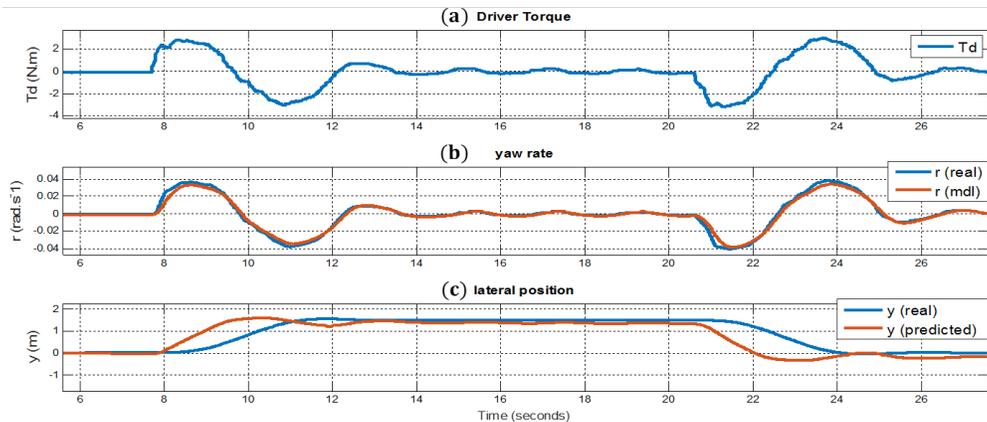


FIGURE 4.10 – Position latérale prédite pour un déplacement latéral de $1,75m$ ($\tau_p = 1s$)

Deuxième phase d'évaluation

La deuxième phase de l'évaluation des trajectoires est caractérisée par la combinaison des meilleures trajectoires longitudinales et latérales dont la faisabilité est étudiée de plus près. Le coût global pour chaque combinaison est donné par :

$$\mathbf{C}_{\text{total},i,j,k} = \mathbf{C}_{x_{i,k}} + \mathbf{C}_{y_{j,k}} \quad (4.23)$$

Dans le cas où la route est rectiligne et ne compte pas d'obstacle, il suffirait de choisir la trajectoire qui minimise la fonction de coût $\mathbf{C}_{\text{total},i,j,k}$ et dont les conditions aux limites sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= \dot{x}_{f,i_{opt}}; & y_f &= y_{f,j_{opt}}; & T_x &= T_{x,k_{opt}}; & \text{et} & & T_y &= T_{y,k_{opt}} \\ \text{où : } & \{i_{opt}, j_{opt}, k_{opt}\} &= & \underset{i,j,k}{\operatorname{argmin}} & \mathbf{C}_{\text{total},i,j,k} \end{aligned} \quad (4.24)$$

La route n'étant pas nécessairement droite, la meilleure trajectoire est à chaque fois transformée dans le repère global et les points de passage sont calculés d'une manière explicite. Cela permet de tenir compte de la géométrie de la route et des obstacles environnants. Ainsi, la trajectoire est inspectée point par point d'une part pour établir si elle respecte les contraintes sur la dynamique du véhicule notamment la courbure limite et l'accélération tolérée et d'autre part afin de s'assurer qu'elle ne mène pas vers une collision avec les obstacles détectés.

La transformation dans le repère global a été précédemment présentée dans les équations 4.2 et 4.3. Appelons donc $x_{r/abs}$, $y_{r/abs}$ et $\psi_{r/abs}$ la transformée de la trajectoire évaluée. Sa courbure est obtenue par l'équation :

$$\kappa_{r/abs} = \frac{\Delta\psi_{r/abs}}{\Delta s_{r/abs}} \quad (4.25)$$

Elle doit respecter deux limites :

1. Premièrement, la courbure limite pour respecter le rayon de braquage minimum déduite des équations d'Ackerman [242] :

$$\kappa_{\max(\text{turn})} = \frac{1}{\sqrt{l_r^2 + l^2 \cot^2(\delta_{\max})}}$$

avec l_r la distance séparant l'essieu arrière du centre de gravité, l l'empattement du véhicule et δ_{\max} l'angle de braquage aux roues maximal.

2. Deuxièmement, la courbure permettant de respecter l'accélération latérale limite don-

née par :

$$\kappa_{max(dynamics)} = \frac{a_{l_{max}}}{v^2}$$

où $a_{l_{max}}$ est l'accélération latérale maximale admise et v la vitesse du véhicule.

Les trajectoires dont la courbure excéderait ces deux limites seraient invalidées. Cette contrainte se traduit comme-suit :

$$|\kappa_{r/abs}| < |\kappa_{max(dynamics)}| \quad (4.26)$$

$$|\kappa_{r/abs}| < |\kappa_{max(turn)}| \quad (4.27)$$

En ce qui concerne la vérification des collisions, une multitude de méthodes ont déjà été proposées dans la littérature. Il est d'usage d'approximer l'espace qu'occupe l'ego-véhicule ainsi que les différents obstacles par des formes géométriques dont les chevauchements signifieraient une collision. Parmi les formes utilisées on trouve l'approximation par des rectangles. Le problème de vérification de collision se formule donc comme un problème de vérification d'un point dans un polygone [236].

Une autre méthode très utilisée considère des cercles pour représenter les objets. Dans [243], le robot et les obstacles sont considérés comme des objets circulaires avec un rayon minimum pour inclure leurs limites physiques. Pour vérifier une collision dans ce cas il suffirait d'établir que la distance entre les centres respectifs de deux objets est inférieure à la somme des rayons des cercles les entourant. Toutefois, cette approximation est trop conservatrice car un objet allongé telle qu'une voiture n'occuperait pas la majeure partie du cercle externe qui l'entourerait ce qui entraîne des fausses détections de collisions. Une alternative serait donc d'utiliser plusieurs cercles internes à la forme de la voiture tel qu'illustre la figure 4.11. Des cercles dont le diamètre est égal à la largeur du véhicule sont distribués sur la longueur de ce dernier. Des marges supplémentaires peuvent être considérées afin de compenser les incertitudes sur les positions du véhicules et des objets détectés.

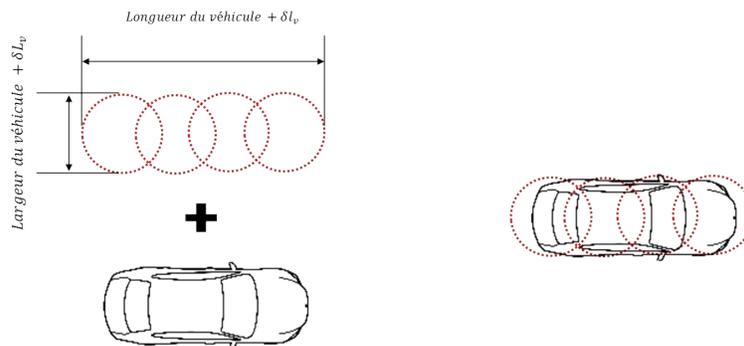
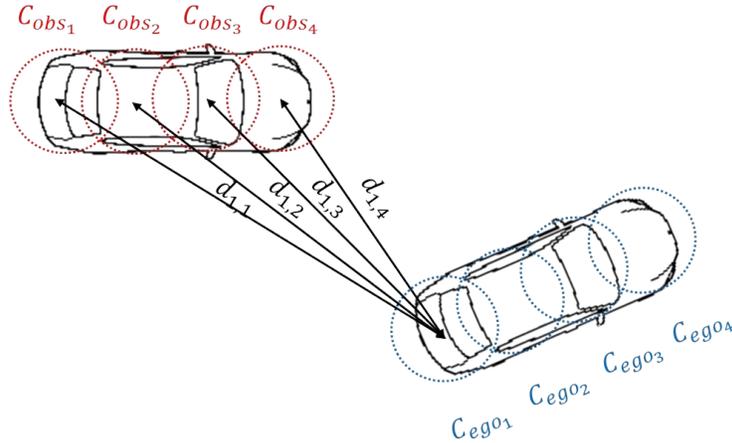


FIGURE 4.11 – Représentation du véhicule par des cercles internes


 FIGURE 4.12 – Vérification d’une collision entre deux véhicules à un instant t_0

En considérant que l’ego-véhicule est représenté par N_{ego} cercles de centres $(x_{c_{ego_i}}, y_{c_{ego_i}})$ et de rayon R_{ego} et qu’un véhicule de trafic est représenté par N_{obs} cercles de centres $(x_{c_{obs_j}}, y_{c_{obs_j}})$ et de rayon R_{obs} comme le montre la figure 4.12 il suffirait que deux des cercles respectifs se croisent pour conclure qu’une collision aura lieu. Ceci est exprimé comme suit :

$$\exists i \in [1, N_{ego}] \wedge \exists j \in [1, N_{obs}] \mid d_{i,j} < (R_{ego} + R_{obs}) \quad (4.28)$$

avec : $d_{i,j} = \sqrt{(x_{c_{ego_i}} - x_{c_{obs_j}})^2 + (y_{c_{ego_i}} - y_{c_{obs_j}})^2}$

Si on considère des obstacles mobiles, la prédiction de leurs mouvements respectifs est essentielle pour effectuer la vérification de collision sur l’horizon temporel sur lequel la trajectoire planifiée s’étend. Il suffit que la condition ci-dessus soit vérifiée à un instant de l’horizon pour conclure que la trajectoire n’est pas sécurisée.

Pour conclure, si la trajectoire évaluée est invalidée car elle ne respecte pas les conditions susmentionnées, la suivante est échantillonnée et la procédure de vérification est ré-exécutée de manière itérative. Cette procédure permet de réduire les ressources en temps et en mémoire nécessaires à l’algorithme de planification de trajectoire.

4.2.3.4 Résultats expérimentaux

Ici nous illustrons le résultat de simulation de la planification de trajectoire coopérative. Les paramètres de l'algorithme utilisés pour les simulations sont rapportés dans le tableau 4.1.

$a_{lim} = 2 \text{ m/s}^2$	$\delta T = 3 \text{ s}$
$\Delta y_{lim} = 1.75 \text{ m}$	$\Delta T = 0.1 \text{ s}$
$M = 60$	$T_{cycle} = 0.1 \text{ s}$
$w_{J,x} = 3$	$w_{J,y} = 0.05$
$w_{t,x} = 3$	$w_{t,y} = 3$
$w_v = 1.5$	$w_y = 2$
$w_d = 10$	$\tau_p = 1 \text{ s}$
$a_{l_{max}} = 3 \text{ m/s}^2$	$\delta_{max} = 55^\circ$

TABLE 4.1 – Paramètres de l'algorithme de planification de trajectoire

La figure 4.13 montre la trajectoire planifiée et le couple du conducteur appliqué. Fig 4.13 (a) montre les trajectoires planifiées à chaque cycle de planification (en rouge) et la concaténation de la trajectoire exécutée (en noir). Le couple conducteur sur la figure 4.13 (b) est échantillonné à la fréquence d'exécution de l'algorithme de planification (T_{cycle}).

Les premières quatre secondes de la simulation lorsque le couple est négligeable, la trajectoire planifiée correspond au centre de la voie. A partir de 4 s nous avons appliqué un couple de forme sinusoïdale de période égale à 8 s.

Pendant cette phase, la trajectoire planifiée va dans le sens du couple appliqué pour emmener le véhicule vers l'écart désiré du conducteur exprimé dans l'équation 4.22 et ainsi l'aider à s'écarter du centre de la voie. A l'instant 8 s le couple du conducteur devient négatif et la trajectoire planifiée revient vers le centre de la voie. Comme nous pouvons remarquer, la trajectoire est comprise dans les limites de la voie ($[-1.75, 1.75]$).

La figure 4.14 illustre la trajectoire latérale en fonction du temps durant cette première simulation. Sur cette figure nous retrouvons la position latérale (Fig4.14 (a)), la vitesse latérale (Fig4.14 (b)) et l'accélération latérale (Fig4.14 (c)) planifiées durant la simulation.

La figure 4.15 illustre la trajectoire planifiée dans la deuxième simulation ou l'on a appliqué un couple conducteur plus agressif (Période de 4 s). Nous remarquons qu'afin de respecter les contraintes sur la dynamique du véhicule, les trajectoires sont plus lentes et n'arrivent pas à suivre les variations rapides du couple conducteur.

Sur la figure 4.16 nous pouvons voir que les trajectoires planifiées sont plus rapides que la première simulation ce qui se traduit par des accélérations latérales plus importantes. Il y a donc un compromis à faire entre le respect des actions du conducteur et celle de la dynamique

du véhicule. Par conséquent, la planification de trajectoire, tout en ayant comme objectif de résoudre le conflit avec le conducteur, tente de limiter ses actions si ces dernières conduisent vers les limites de la dynamique du véhicule.

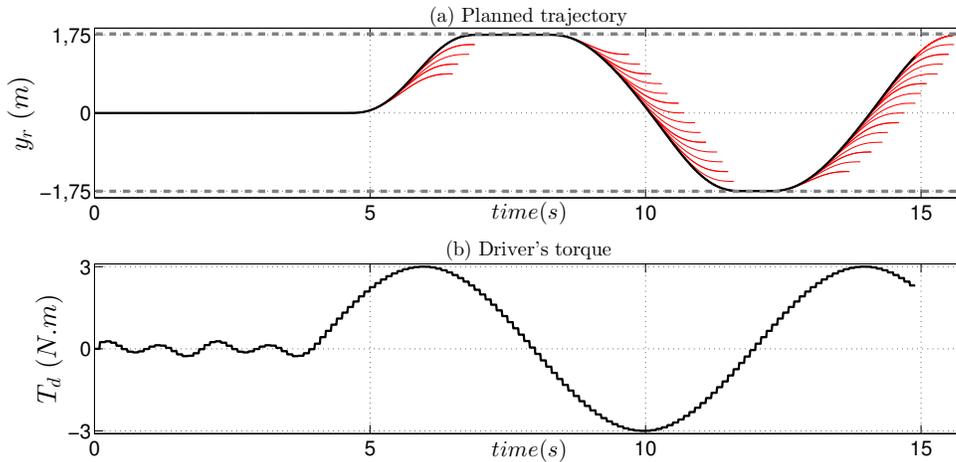


FIGURE 4.13 – Simulation 1 : La trajectoire planifiée avec un couple du conducteur de forme sinusoïdale de période 8 s

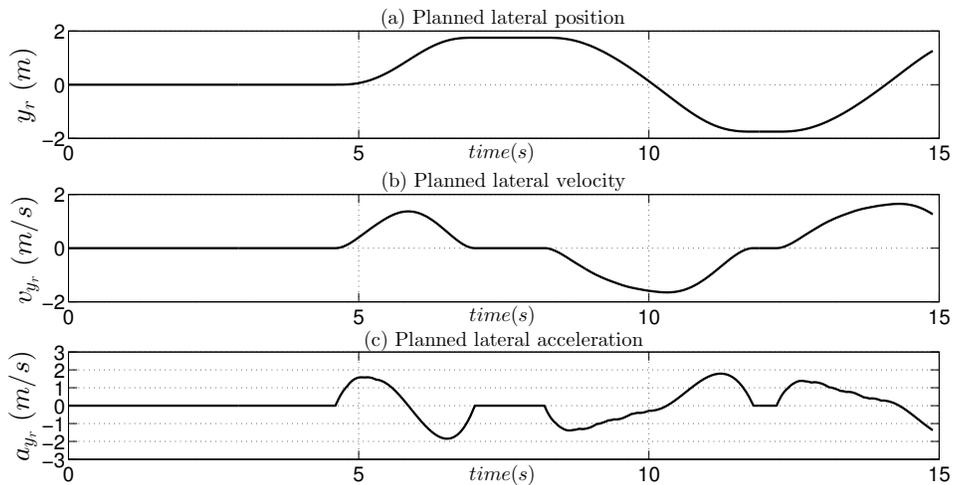


FIGURE 4.14 – Simulation 1 : Position, vitesse et accélération latérales planifiées

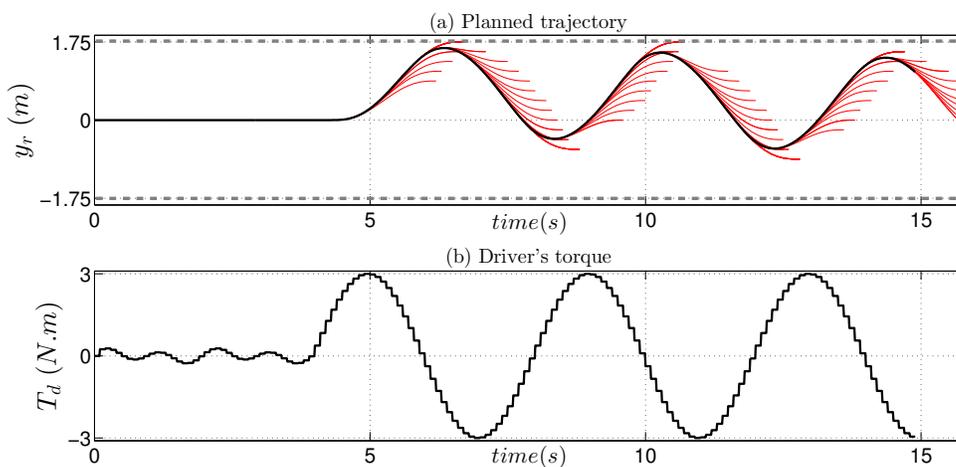


FIGURE 4.15 – Simulation 2 : La trajectoire planifiée avec un couple du conducteur de forme sinusoïdale de période 4 s

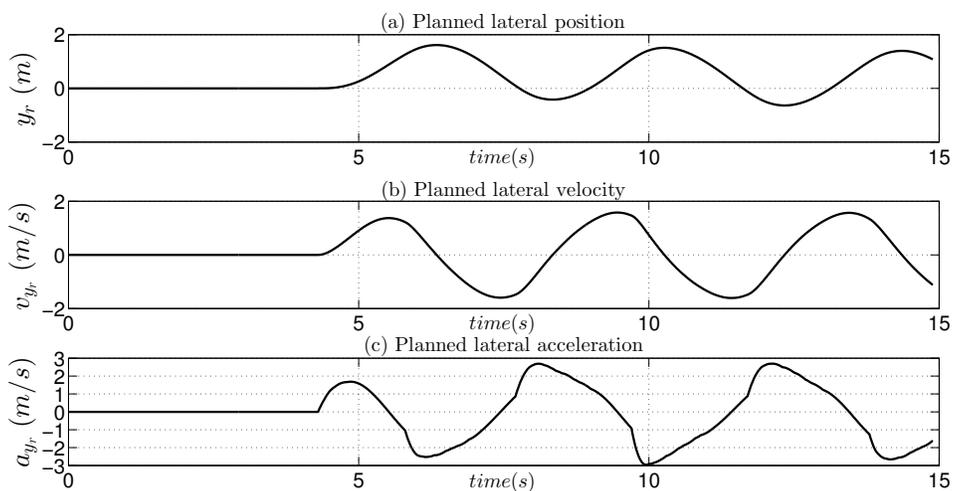


FIGURE 4.16 – Simulation 2 : Position, vitesse et accélération latérales planifiées

4.3 La commande latérale pour le contrôle partagé

4.3.1 Introduction

Cette section présente l'architecture de contrôle latéral permettant de faire du contrôle partagé au niveau opérationnel de la tâche de conduite. Nous commençons par une présentation générale de la structure de contrôle suite à laquelle nous exposons le modèle utilisé pour la synthèse de la commande où les choix faits seront discutés. Par la suite, la théorie de contrôle optimal derrière la synthèse des contrôleurs est détaillée. Enfin, des résultats illustrant l'approche seront présentés.

4.3.2 La structure de commande latérale adoptée

L'étage de commande latérale dédié au contrôle partagé repose sur l'architecture de contrôle présentée dans [163][72][244]. Cette dernière se décline en deux niveaux : un niveau de prise de décision pour déterminer l'autorité (σ) et un niveau de contrôle tel qu'illustré sur la figure 4.1.

Le niveau de contrôle est basé sur la théorie du contrôle optimal H_2 . La synthèse de la commande tient compte du modèle de la colonne de direction, par conséquent le véhicule est commandé en couple. En outre, en incluant un modèle conducteur dans le modèle, les interactions avec le conducteur au niveau du volant sont prises en compte. Le vecteur de performance est un compromis entre l'erreur de positionnement latéral, l'erreur de cap, l'accélération latérale, la vitesse de braquage et les interférences des couples conducteur et d'assistance.

Le couple du système est une somme pondérée de la sortie de deux contrôleurs optimaux locaux comme indiqué dans l'équation 4.29 (Fig. 4.1).

$$T_{System} = (1 - \sigma).T_{LK} + \sigma.T_{DA}, \quad \sigma \in [0, 1] \quad (4.29)$$

Synthétisés autour du même modèle, les deux contrôleurs locaux sont conçus avec des objectifs opposés. Le premier, **LK** (i.e Lane Keeping), a pour objectif principal de minimiser l'erreur de suivi de la trajectoire planifiée et dans le cas où celle-ci correspond au centre de la voie, joue le rôle d'un système de maintien de voie visant à maintenir le véhicule bien au centre. Ce contrôleur est capable de conduire le véhicule de manière autonome sur une route contenant des courbures tout en garantissant de petites erreurs de positionnement latéral. Selon [147], ce contrôleur correspondrait au LoHA le plus élevé. Il assure de bonnes performances de maintien de voie (Celles-ci sont rapportées dans la section 5.3.3.1) mais comme il se montre assez autoritaire sur la direction, il est moins facile pour le conducteur

de s'écarter de la trajectoire du système sans appliquer un effort important. L'objectif du second contrôleur consiste à minimiser la différence entre sa sortie et le couple fourni par le conducteur. Il se comporte ainsi de manière similaire à une direction assistée ou à un système haptique dont la raideur est négative comme décrit dans [245]. Par conséquent, le contrôleur génère un couple qui amplifie l'action de guidage du conducteur, ce qui permet une conduite avec un effort réduit. Nous appelons ce contrôleur **DA** (i.e Driver Assist).

La sortie finale de l'étage de contrôle latéral combine la sortie des deux contrôleurs LK et DA en fonction de la valeur de σ (eq 4.29).

Le niveau de prise de décision (figure 4.1) donne la liberté de définir le mode de fonctionnement du système en fonction des exigences de l'application. Il délivre la variable de pondération σ utilisée pour gérer en douceur l'autorité haptique (LoHA) entre le conducteur et le système.

4.3.3 Modélisation du système Conducteur Véhicule Environnement

Cette section présente la modélisation du triplet Conducteur-Véhicule-Route (*CVE*) autour de laquelle la synthèse du contrôleur est faite.

4.3.3.1 Modèle du véhicule

Modèle bicyclette (dynamique latérale) : Pour la modélisation du véhicule nous avons fait le choix du modèle bicyclette. Alliant simplicité et bonne représentativité de la dynamique latérale, ce dernier est largement utilisé dans les applications de contrôle latéral [246]. Le modèle suppose une parfaite symétrie entre les roues droites et les roues gauches en terme de dynamique ce qui permet de simplifier la représentation du véhicule en remplaçant les deux roues avant (respec. arrières) par une seule roue au milieu de chaque essieu comme l'illustre la figure 4.17.

Pour la conduite sur autoroute, il est commun d'émettre deux hypothèses pour simplifier le modèle :

1. La route est considérée plane et uniforme (sans dévers ni pente)
2. Le mouvement de translation se réduit à deux degrés de liberté : le mouvement vertical est négligé et on ne considère que les translations longitudinale et latérale

A partir de ces hypothèses, les équations du mouvement latéral dans le repère véhicule (\mathcal{R}^v) sont déduites en appliquant le principe fondamental de la mécanique de Newton [247] :

$$\begin{cases} mv_x(\dot{\beta} + r) = F_{yf} + F_{yr} + f_w \\ I_z \dot{r} = l_f F_{yf} - l_r F_{yr} + l_w f_w \end{cases} \quad (4.30)$$

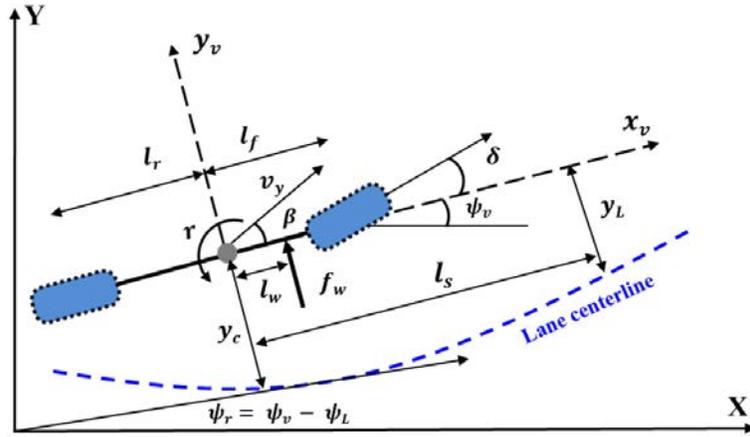


FIGURE 4.17 – Représentation du modèle bicyclette

où : m est la masse du véhicule, v_x la vitesse longitudinale, β l'angle de dérive au centre de gravité, I_z le moment d'inertie verticale du véhicule, r la vitesse de lacet, l_f (respect. l_r) la distance entre l'essieu avant (respect. arrière) et le centre de gravité du véhicule et enfin F_{yf} et F_{yr} respectivement les forces latérales au niveau des roues avant et des roues arrière. f_w est la force latérale du vent ayant comme centre d'impact distant de l_w du centre de gravité. Celle-ci apparaît comme une perturbation dans le système.

Les forces latérales sont décrites par :

$$F_{yf} = 2C_f\alpha_f, \quad F_{yr} = 2C_r\alpha_r \quad (4.31)$$

avec : C_f et C_r respectivement les coefficients de raideur latérale des pneumatiques avant et arrière. α_f et α_r les angles de dérive des roues avant et arrière.

Avec l'hypothèse que l'angle aux roues δ est petit, une approximation permet d'exprimer les angles de dérives des roues en fonction de l'angle de dérive au centre de gravité β (voir Fig. 4.17) comme suit :

$$\alpha_f = \delta - \beta - \frac{rl_f}{v_x}, \quad \alpha_r = -\beta + \frac{rl_r}{v_x} \quad (4.32)$$

A partir des équations 4.31 et 4.32, les équations dans 4.30 permettent de déterminer la dynamique de l'angle de dérive β et de la vitesse de lacet r :

$$\begin{cases} \dot{\beta} = -\frac{2(C_f + C_r)}{mv_x} \beta + \left(\frac{2(C_rl_r - C_fl_f)}{mv_x^2} - 1 \right) r + \frac{2C_f}{mv_x} \delta + \frac{1}{mv_x} f_w \\ \dot{r} = \frac{2(-C_fl_f + C_rl_r)}{I_z} \beta - \frac{2(C_fl_f^2 + C_rl_r^2)}{v_x I_z} r + \frac{2l_f C_f}{I_z} \delta + \frac{l_w}{I_z} f_w \end{cases} \quad (4.33)$$

Positionnement latéral : L'objectif du contrôleur est de suivre la trajectoire planifiée. A cet effet, le positionnement latéral du véhicule est défini par deux variables : l'écart latéral représenté par la distance euclidienne entre le centre de gravité du véhicule et la trajectoire (y_c), et l'erreur de cap (ψ_L) qui représente la différence entre le cap du véhicule ψ_v et la tangente de la trajectoire ψ_r donnée par :

$$\psi_L = \psi_v - \psi_r$$

Cela est schématisé sur la figure 4.17.

Afin d'introduire une certaine anticipation dans le contrôle latéral, et pour tenir compte des mesures du système de vision qui donne l'erreur de positionnement sur une certaine distance devant le véhicule, nous utilisons l'écart latéral y_L calculé sur une distance d'anticipation l_p à la place de l'erreur de position au centre de voie y_c .

La dynamique de ces deux erreurs est donnée par [73] :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_L = r - \rho_r v_x \\ \dot{y}_L = \beta v_x + l_p r + \psi_L v_x \end{cases} \quad (4.34)$$

ρ_r est la courbure de la route. Elle est définie par l'inverse du rayon de courbure de la route comme suit :

$$\rho_r = \frac{1}{R_r}$$

La courbure de la route sera également considérée comme une perturbation à rejeter.

Modèle de la colonne de direction : Dans de nombreux travaux sur le contrôle latéral, le signal de commande considéré est l'angle au volant δ_d . Cette méthode permet de compenser les non linéarités du système de direction ce qui améliore la robustesse de la commande [248][249]. L'inconvénient réside dans le fait que l'intervention du conducteur au niveau du volant soit perçue comme une perturbation à rejeter ce qui est opposé à notre objectif de contrôle partagé. Les interactions en termes de couple sont plus naturelles lors du partage de contrôle. En effet, le canal haptique par le biais du couple d'auto-alignement permet déjà de faire parvenir de nombreuses informations aux conducteur à l'exemple de l'état de la chaussée, de l'adhérence, l'état des pneus, etc... Pour cela nous avons fait le choix de contrôler en couple.

La figure 4.18 présente le modèle de la colonne de direction utilisé. L'application des lois fondamentales de la dynamique en bas de la colonne donne :

$$J_s \ddot{\delta}_d + B_s \dot{\delta}_d = T_d + T_s - T_{al} \quad (4.35)$$

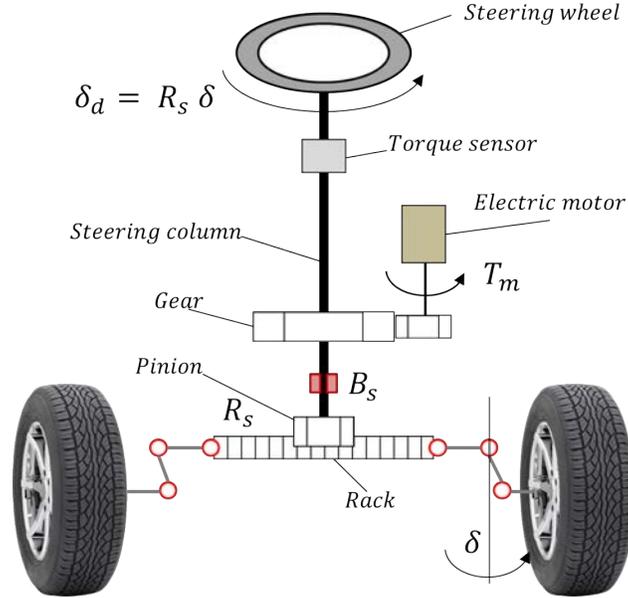


FIGURE 4.18 – Représentation du modèle de la colonne de direction

où : δ_d est l'angle au volant, J_s le moment d'inertie équivalent du système de direction et B_s son coefficient d'amortissement équivalent.

T_d dénote le couple conducteur et T_s le couple du système qui est égal au couple du moteur électrique T_m (voir Fig. 4.18).

Le couple d'auto-alignement T_{al} s'exprime par :

$$T_{al} = -\frac{2C_f\eta_t}{R_s} \beta - \frac{2l_f C_f \eta_t}{R_s v_x} r + \frac{2C_f\eta_t}{R_s^2} \delta_d \quad (4.36)$$

où : R_s est le rapport de réduction entre l'angle au volant δ_d et l'angle aux roues δ .

Le calcul du couple d'auto-alignement nécessite de considérer le point d'application des forces latérales des roues. En effet, la force latérale d'un pneumatique ne s'applique pas sur le point de projection du centre de la roue sur la bande de roulement mais s'applique en un point en retrait d'une distance η_t comme expliqué dans [73][246].

A partir des équations (4.33), (4.34) et (4.35) la représentation d'état du système s'exprime par :

$$\dot{x}_v = A_v x_v + B_{vu} u_v + B_{vw} w \quad (4.37)$$

Où : $x_v = [\beta \ r \ \psi_L \ y_L \ \delta_d \ \dot{\delta}_d]^\top$ est le vecteur d'état, $w = [f_w \ \rho_r]^\top$ le vecteur de perturbations et l'entrée de la commande u_v se compose des couples d'assistance T_s et conducteur T_d ($u_v = T_s + T_d$).

Les matrices du système sont données par :

$$A_v = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & b_1/R_s & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & b_2/R_s & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_x & l_p & v_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}, \quad B_{vu} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_s \end{bmatrix}$$

$$B_{vw}^T = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -v_x & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = \frac{-2(C_r + C_f)}{mv_x}, \quad a_{12} = \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{mv_x^2} - 1, \quad a_{21} = \frac{2(l_r C_r - l_f C_f)}{I_z}$$

$$a_{22} = \frac{-2(l_r^2 C_r + l_f^2 C_f)}{I_z v_x}, \quad b_1 = \frac{2C_f}{mv_x}, \quad b_2 = \frac{2l_f C_f}{I_z}, \quad e_1 = \frac{1}{mv_x}, \quad e_2 = \frac{l_w}{I_z}$$

$$a_{61} = \frac{2C_f \eta_t}{R_s J_s}, \quad a_{62} = \frac{2C_f l_f \eta_t}{R_s v_x J_s}, \quad a_{65} = \frac{-2C_f \eta_t}{R_s^2 J_s}, \quad a_{66} = \frac{-B_s}{J_s}$$

4.3.3.2 Modèle du conducteur

Dans le but d'intégrer les interactions au niveau du volant entre le conducteur et le système, nous augmentons le modèle utilisé pour la synthèse de la commande avec un modèle conducteur.

Il a été montré dans la littérature que le conducteur s'appuie sur deux points visuels pour guider son véhicule sur la route [7][127] : Un point "*lointain*" lui permettant d'anticiper l'évolution de la courbure et un point "*proche*" qui lui confère un comportement compensatoire. Ces points peuvent être caractérisés par les deux angles θ_{near} et θ_{far} comme utilisé dans [128]. L'angle θ_{far} représente l'angle entre le cap du véhicule et la tangente au virage. Quant à θ_{near} , il représente l'angle entre le cap du véhicule et la droite liant le centre de gravité du véhicule et le point du bord de la voie se situant sur une distance de l_d comme illustré sur la figure 4.19.

Afin que l'intégration du modèle conducteur soit possible nous utilisons une version simplifiée du modèle présenté dans [128] dont le schéma est montré sur la figure 4.20. En prenant comme entrée les deux angles visuels θ_{near} et θ_{far} , le modèle reproduit les deux comportements anticipatoire et compensatoire. T_l et T_i représentent des constantes de temps, respectivement, d'avance et de retard du comportement compensatoire.

Le modèle inclut également un modèle neuromusculaire du conducteur qui rajoute un

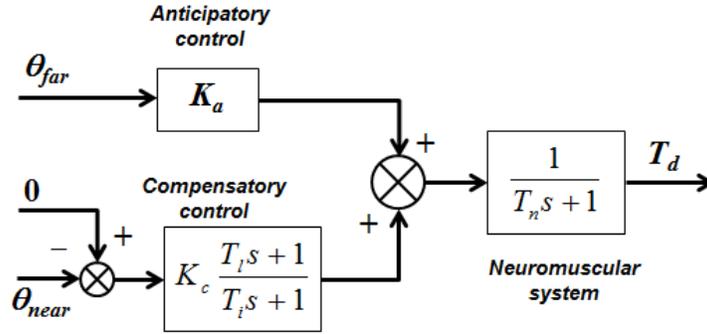


FIGURE 4.20 – Schéma synoptique du modèle conducteur utilisé

l_d est la distance au point "proche" et T_p le temps d'anticipation correspondant. L'écart latéral y_d (voir fig.4.19) se calcul par :

$$y_d = y_L + (l_d - l_p)\psi_L \quad (4.41)$$

Par conséquent θ_{near} s'écrit comme suit [128] :

$$\theta_{near} = \frac{y_L}{v_x T_p} + \left(1 - \frac{l_p}{v_x T_p}\right)\psi_L \quad (4.42)$$

θ_{far} représente l'angle entre le cap du véhicule et le point tangent. Lorsque le conducteur poursuit le point "lointain" à une distance L_f , en utilisant un développement de Taylor de premier ordre la courbure prédite par le conducteur est donnée par :

$$\rho_{tp} = r/v_x + L_f \dot{r}/v_x^2 \quad (4.43)$$

où l'accélération de lacet \dot{r} est exprimée par :

$$\dot{r} = a_{21}\beta + a_{22}r + b_2\delta_d \quad (4.44)$$

Comme on peut voir sur la figure 4.19, au point tangent ($\rho_{tp} = 1/R_{tp}$), une approximation permet d'écrire $\theta_{far} = L_f/R_{tp}$ ce qui donne :

$$\theta_{far} = \theta_1\beta + \theta_2r + \theta_3\delta_d \quad (4.45)$$

Avec : $\theta_1 = \tau_a^2 a_{21}$, $\theta_2 = \tau_a + \tau_a^2 a_{22}$ et $\theta_3 = \tau_a^2 b_2 / R_s$.

Notons que $\tau_a = L_f/v_x$ est le temps d'anticipation au point tangent ("lointain").

A partir des équations (4.42) et (4.45) nous écrivons :

$$u_d = [\theta_{near} \ \theta_{far}]^\top = Cx_v \quad (4.46)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 - \frac{l_p}{v_x T_p} & \frac{1}{v_x T_p} & 0 & 0 \\ \theta_1 & \theta_2 & 0 & 0 & \theta_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

A partir de (4.37), (4.38), (4.42) et (4.45) nous écrivons le modèle *CVE* :

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w \quad (4.48)$$

Avec le vecteur d'état et d'entrées augmentés sont respectivement $x = [x_v^\top \ x_d^\top]^\top$ et $u = T_s$. Les matrices du système sont données par :

$$A = \begin{bmatrix} A_v & B_v C_d \\ B_d C & A_d \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} B_v \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} B_{vw} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

4.3.4 Synthèse de la commande

La synthèse des contrôleurs est axée autour des objectifs suivants :

- (i) *Stabilité et performance de suivi* : les contrôleurs doivent assurer la stabilité en boucle fermée du système *CVE* en minimisant l'erreur de suivi de trajectoire.
- (ii) *Compensation de l'amortissement* : lorsque le conducteur relâche le volant sans appliquer de couple, les effets d'oscillations doivent être atténués pour améliorer le confort.
- (iii) *Minimisation des conflits* : permettre le partage de contrôle et la résolution de conflits.

Notons que les objectifs susmentionnés sont conflictuels ce qui rend l'utilisation d'un seul contrôleur inadaptée. Par conséquent, nous employons une stratégie de contrôle inspirée du concept de "*commutation entre contrôleurs multiples*" [250]. A cet effet, l'étage de contrôle se compose de deux contrôleurs locaux qui sont dédiés à des objectifs différents : D'une part, un contrôleur qui a l'objectif de suivre la trajectoire et d'autre part un contrôleur dont l'objectif est de minimiser le conflit (suit l'action du conducteur) et qui permet au conducteur de prendre toute l'autorité sur la direction du véhicule.

La sortie unifiée de contrôle consiste en une somme pondérée des sorties des contrôleurs locaux **LK** et **DA** comme suit :

$$u = T_s = \alpha_1 T_{LK} + \alpha_2 T_{DA} \quad (4.50)$$

avec $\alpha_1 = 1 - \sigma$ et $\alpha_2 = \sigma$. σ étant la variable d'autorité décidée dans le haut niveau.

Celle-ci varie en continu dans l'intervalle $[0, 1]$ (voir figure 4.1). Notons que l'entrée T_s correspond à une combinaison convexe de T_{LK} et T_{DA} et l'idée derrière cette stratégie peut être interprétée comme la somme pondérée des couples des deux contrôleurs en fonction de la variable d'autorité σ .

Caractérisation de la performance en boucle fermée La performance de la loi de commande (eq. 4.50) dépend de la variable de performance. Par conséquent, la définition de cette variable pour chaque contrôleur **LK** et **DA** est cruciale à l'accomplissement des objectifs de la structure de contrôle donnés plus haut.

Nous considérons le modèle *CVE* et le vecteur performance par l'expression :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_w w \\ z_\alpha &= C_\alpha x + D_\alpha u + E_\alpha w \end{aligned} \quad (4.51)$$

où les matrices de performance variant dans le temps sont définies par :

$$\begin{aligned} z_\alpha &= \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2, & C_\alpha &= \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 \\ D_\alpha &= \alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2, & E_\alpha &= \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 \end{aligned} \quad (4.52)$$

Afin d'être conforme avec (4.50) nous soulignons que l'indice 1 (respect. 2) dans (4.52) correspond au contrôleur **LK** (respect. **DA**).

Dans ce qui suit nous exposons comment caractériser la performance en boucle fermée à travers la définition des matrices de performance C_i , D_i et E_i ($i = 1, 2$). Afin d'améliorer l'interaction entre le conducteur et le système, la variable de performance devrait représenter la performance de suivi de trajectoire, le confort de la conduite et les interférences d'interaction. Pour cela cette variable est mise sous la forme :

$$z_i = \mathcal{W}_i y, \quad i = 1, 2 \quad (4.53)$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathcal{W}_i &= \text{diag}(W_{iay}, W_{i\dot{\psi}_L}, W_{i\theta_{near}}, W_{i\theta_{far}}, W_{i\dot{\delta}_d}, W_{i\Delta T}) \\ y &= [a_y \quad \dot{\psi}_L \quad \theta_{near} \quad \theta_{far} \quad \dot{\delta}_d \quad T_d - \lambda_c T_s]^\top \end{aligned}$$

Notons que pour deux matrices carrées X_1 et X_2 , la notation $\text{diag}(X_1, X_2)$ réfère à la

matrice où X_i est la $i^{\text{ème}}$ matrice sur sa diagonale. Les matrices de pondération \mathcal{W}_1 et \mathcal{W}_2 sont choisies selon l'objectif de contrôle de chaque contrôleur local. La forme de la variable de performance z_i dans l'équation (4.53) requiert une attention particulière.

En effet, la performance de suivi de trajectoire est représentée par θ_{near} avec $\mathcal{W}_{i\theta_{near}}$ et θ_{far} (pondérée avec $\mathcal{W}_{i\theta_{far}}$) qui apporte le comportement anticipatoire.

Par ailleurs, le confort de conduite est représenté par l'accélération latérale a_y (pondérée avec \mathcal{W}_{ia_y}) et la vitesse de lacet par rapport à la route $\dot{\psi}_L$ (pondérée par $\mathcal{W}_{i\dot{\psi}_L}$). L'introduction de $\dot{\delta}_d$ (pondérée par $\mathcal{W}_{i\dot{\delta}_d}$) entend apporter un certain confort de guidage et améliorer la réponse d'amortissement.

Les interférences négatives (conflit) entre le système et le conducteur sont définies par le terme $T_d - \lambda_c T_s$ avec la pondération correspondante $\mathcal{W}_{i\Delta T}$. Nous verrons plus loin que ce terme donne un indicateur quadratique de performance qui inclue :

$$W_{i\Delta T}^2 (T_d - \lambda_c T_s)^2 = W_{i\Delta T}^2 (T_d^2 + \lambda_c^2 T_s^2 - 2\lambda_c T_d T_s) \quad (4.54)$$

Pour $\lambda_c > 0$, la condition permettant de minimiser le coût dans (4.54) serait de garantir que le produit des couples $T_d T_s$ soit positif. Cela permet d'éviter les situations de conflit entre le conducteur et le système. Ce conflit se traduit par le sentiment de résistance envers les actions du conducteur.

Notons que tous les éléments de y dans (4.53) peuvent être exprimés en fonction du vecteur d'état x . Par conséquent, les matrices de performance peuvent être écrites comme suit :

$$C_i = \mathcal{W}_i C_{yx}, \quad D_i = \mathcal{W}_i D_{yu}, \quad E_i = \mathcal{W}_i E_{yw}, \quad i = 1, 2 \quad (4.55)$$

avec :

$$C_{yx} = \begin{bmatrix} 0 & v_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_x T_p - l_p}{v_x T_p} & \frac{1}{v_x T_p} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \theta_1 & \theta_2 & 0 & 0 & \theta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{yu} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\lambda_c]^\top$$

$$E_{yw} = \begin{bmatrix} 0 & -v_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^\top$$

Maintenant que la forme des matrices de performance est définie, il reste plus qu'à bien paramétrer \mathcal{W}_1 et \mathcal{W}_2 afin d'obtenir les comportements voulus pour les deux contrôleurs **LK** et **DA**.

1) *Le contrôleur **LK*** : Comme expliqué précédemment, ce contrôleur a pour objectif principal le suivi de la trajectoire. Pour cela, la matrice \mathcal{W}_1 est choisie de manière à fournir la meilleure performance de contrôle en terme de suivi de trajectoire. Nous mettons $W_{1\Delta T} = 0$ ce qui signifie que ce contrôleur ne considère pas l'objectif de gestion du conflit.

2) *Le contrôleur **DA*** : Ce contrôleur aura l'objectif de se conformer à l'action du conducteur. Pour ce cas particulier, la matrice \mathcal{W}_2 est réglée en jouant sur les paramètres $W_{2\Delta T}$ et λ_c afin de favoriser le suivi de l'action du conducteur au détriment du suivi de trajectoire.

Synthèse basée sur le contrôle optimal Nous exposons les détails de la synthèse des deux contrôleurs locaux dans ce qui suit.

Considérons le critère de performance suivant :

$$\mathcal{J}_\alpha = \int_0^\infty z_\alpha(\tau)^\top z_\alpha(\tau) d\tau = \int_0^\infty \xi(\tau)^\top \mathbb{Q} \xi(\tau) d\tau \quad (4.56)$$

avec :

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ u \\ w \end{bmatrix}, \quad \mathbb{Q} = \begin{bmatrix} Q_\alpha & S_\alpha & N_\alpha \\ S_\alpha^\top & R_\alpha & M_\alpha \\ N_\alpha^\top & M_\alpha^\top & G_\alpha \end{bmatrix}$$

Les matrices de pondération du critère de performance sont données par :

$$Q_\alpha = C_\alpha^\top C_\alpha, \quad S_\alpha = C_\alpha^\top D_\alpha, \quad N_\alpha = C_\alpha^\top E_\alpha$$

$$R_\alpha = D_\alpha^\top D_\alpha, \quad M_\alpha = D_\alpha^\top E_\alpha, \quad G_\alpha = E_\alpha^\top E_\alpha$$

Avec l'expression de z_α dans (4.52), le critère de performance \mathcal{J}_α permet de considérer tous les couplages possibles entre les variables x , u et w . En particulier, le couplage entre le couple du conducteur et celui du système qui est lié au conflit peut directement être géré par la matrice S_α .

Réécrivons (4.50) sous forme de retour d'état comme suit :

$$u = (\alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2)x = K_\alpha x \quad (4.57)$$

où $T_{LK} = K_1 x$, $T_{DA} = K_2 x$, et ainsi, le gain K_α est calculé de sorte à ce que la boucle fermée du système (4.51) satisfasse les objectifs définis dans (§ 4.3.4). A cet effet, nous synthétisons un contrôleur de la forme (4.57) qui minimise le critère de performance \mathcal{J}_α .

Notons que cela correspond à un problème de contrôle \mathcal{H}_∞ standard.

Supposons qu'il existe une fonction de Lypunov de la forme :

$$\mathbb{V}(x) = x^\top P x, \quad P > 0$$

(($P > 0$) i.e P est définie positive) qui satisfait l'inégalité de Hamilton-Jacobi suivante :

$$\dot{\mathbb{V}}(x) + z^\top z_\alpha < \gamma w^\top w - 2\zeta \mathbb{V}(x) \quad (4.58)$$

où γ et ζ sont des scalaires positifs. Etant donné que $\mathbb{V}(x) \geq 0$, l'intégration des deux côtés de (4.58) de 0 à ∞ donne :

$$\int_0^\infty z_\alpha(\tau)^\top d\tau < \mathbb{V}(0) - \mathbb{V}(\infty) + \gamma \int_0^\infty w(\tau)^\top w(\tau) d\tau \quad (4.59)$$

La borne supérieure du critère de performance sera donnée par :

$$\mathcal{J}_\alpha < x_0^\top P x_0 + \gamma \eta \quad (4.60)$$

avec x_0 la condition initiale de 4.51, le scalaire positif η représente la limite supérieure de l'énergie de la perturbation w . Notons à partir de (4.60) que pour un x_0 et η donné, le critère \mathcal{J}_α peut être minimisé en minimisant le scalaire γ .

A partir de (4.57) et en substituant les matrices de la boucle fermée (4.51) dans (4.58) nous obtenons :

$$\begin{aligned} \Xi &= \dot{x}^\top P x + x^\top P \dot{x} + z_\alpha^\top z_\alpha - \gamma w^\top w + 2\zeta \mathbb{V}(x) \\ &= \text{He}\left([(A + B_u K_\alpha)x + B_w w]^\top P x + \zeta x^\top P x \right) \\ &\quad + [(C_\alpha + D_\alpha K_\alpha)x + E_\alpha w]^\top (*) - \gamma w^\top w < 0 \end{aligned} \quad (4.61)$$

Avec $\text{He}(X) = X + X^\top$, et le symbole $*$ réfère aux blocs d'une matrice qui peuvent être déduits par symétrie. L'inégalité (4.61) peut être réécrite sous la forme compacte suivante :

$$\Xi = \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^\top \Theta \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} < 0 \quad (4.62)$$

A partir de (4.62) il devient clair que (4.58) est vérifiée si :

$$\Theta = \begin{bmatrix} \text{He}(PA + PB_u K_\alpha + \zeta P) & PB_w \\ B_w^\top P & -\gamma I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_\alpha^\top + K_\alpha^\top D_\alpha^\top \\ E_\alpha^\top \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\alpha + D_\alpha K_\alpha & E_\alpha \end{bmatrix} < 0 \quad (4.63)$$

I représente la matrice identité. En appliquant le complément de Schur [251], il peut être prouvé que la condition (4.63) est équivalente à :

$$\begin{bmatrix} \text{He}(PA + PB_u K_\alpha + \zeta P) & * & * \\ B_w^\top P & -\gamma I & * \\ C_\alpha + D_\alpha K_\alpha & E_\alpha & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.64)$$

Posons $X = P^{-1}$. La multiplication des deux côtés de (4.64) par $\text{diag}(X, I, I)$ suivie par le changement de variable

$$M_\alpha = K_\alpha X \quad (4.65)$$

permet de prouver que (4.64) est équivalente à :

$$\begin{bmatrix} \text{He}(AX + B_u M_\alpha + \zeta X) & * & * \\ B_w^\top & -\gamma I & * \\ C_\alpha X + D_\alpha M_\alpha & E_\alpha & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.66)$$

Notons que l'inégalité (4.66) est présentée sous la forme d'une inégalité matricielle linéaire paramétrée [252] :

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \alpha_i \alpha_j \Psi_{ij} \quad (4.67)$$

où Ψ_{ij} est donnée par :

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} \text{He}(AX + B_u M_j + \zeta X) & * & * \\ B_w^\top & -\gamma I & * \\ C_i X + D_i M_j & E_i & -I \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Le résultat sur la relaxation présenté dans [252] permet de dire que la condition (4.67) est vérifiée si :

$$\begin{aligned} \Psi_{ii} &< 0, \quad i \in \{1, 2\} \\ 2\Psi_{ii} + \Psi_{ij} + \Psi_{ji} &< 0, \quad i, j \in \{1, 2\} \text{ et } i \neq j \end{aligned} \quad (4.69)$$

Les résultats de ces développements théoriques peuvent être résumés dans le théorème

suivant :

Théorème 1.

Pour tout système défini par (4.51) avec ζ un scalaire positif, la loi de commande (4.57) stabilise (4.51) tout en minimisant le critère de performance (4.56) s'il existe une matrice X définie positive, des matrices M_1, M_2 , et un scalaire positif γ qui satisfont l'optimisation convexe suivante :

$$\min_{X, M_1, M_2} \gamma \quad (4.70)$$

Sujette aux LMIs (4.69) avec Ψ_{ij} donné dans (4.68). De plus, le gain de retour peut être calculé à partir de (4.65) suivant :

$$K_i = M_i X^{-1}, \quad i = 1, 2 \quad (4.71)$$

Notons que les conditions de synthèse dans le théorème sont entièrement indépendantes du signal d'autorité σ . Cela signifie que la stabilité de la boucle fermée est assurée pour un σ quelconque. Ce théorème fournit une méthode systématique pour la synthèse de deux contrôleurs **LK** et **DA** en formulant le problème sous forme d'un problème d'optimisation convexe dont la solution est calculée d'une manière efficace à l'aide des outils numériques disponibles aujourd'hui.

4.3.5 Résultats

4.3.5.1 Résultats de la conduite entièrement automatisée (contrôleur LK)

Les paramètres du modèle *CVE* utilisés lors des implémentations sont donnés dans le tableau 4.2. Les paramètres du modèle conducteur ont été obtenus suite à une identification en utilisant des données recueillies à partir du simulateur de conduite SHERPA-LAMIH (voir §5.2) [244].

Paramètre	Valeur
m	2025 kg
l_f	1.3 m
l_r	1.6 m
l_w	0.4 m
l_p	5 m
η_t	0.13 m
I_z	2800 kg.m ²
J_s	0.05 kg.m ²
R_s	16
B_s	5.73
C_f	57000 N/rad
C_r	59000 N/rad
T_l	1.57
T_i	0.18
K_a	15.70
K_c	6.83
T_n	0.11
T_p	0.78
τ_a	1.05

TABLE 4.2 – Paramètres du modèle *CVE*

Nous illustrons ici les performances du contrôleur **LK** synthétisé avec un objectif de suivi de trajectoire. A cet effet, nous avons fait un test en conduite automatique sur une version numérisée du circuit de test de Satory (voir figure 4.21(a)).

Les résultats sont rapportés sur les figures 4.21(b), (c), (d), (e) et (f). Nous attirons particulièrement le regard sur les deux figures 4.21(c) et (d) qui représentent les erreurs de suivi de trajectoire obtenues pendant ce test sur le circuit Satory avec le contrôleur **LK**. On peut clairement constater que le contrôleur parvient à bien suivre le centre de la voie en garantissant des erreurs de positionnement latéral et des erreurs de cap acceptables.

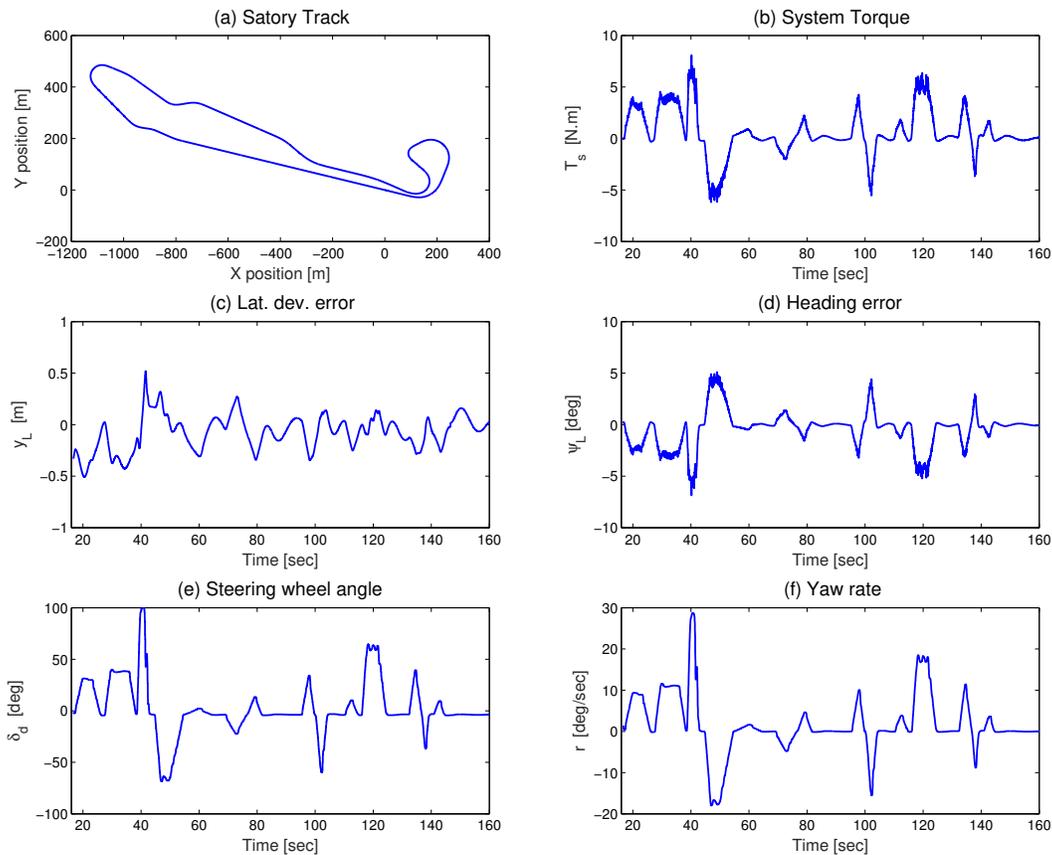


FIGURE 4.21 – (a) Circuit de test Satory ; (b) Couple du système (T_{LK}) ; (c) Erreur de positionnement latéral ; (d) Erreur de Cap ; (e) Angle au volant ; (f) Vitesse de lacet

4.3.5.2 Influence du contrôleur DA

Afin de bien expliquer le rôle de chaque contrôleur, la figure 4.22 illustre différents couples du système lorsque la trajectoire correspond au centre de la voie et que le conducteur essaye de s'en écarter. La trajectoire latérale du véhicule pendant la manœuvre est représentée sur la figure 4.22 (a). Par ailleurs, la figure 4.22 (b) montre la commande calculée par les contrôleurs locaux DA (bleu), LK (rouge) et le couple final du système pour les deux valeurs de σ (0,3 (vert) et 0,7 (jaune)).

Alors que le conducteur s'éloigne du centre de la voie, le couple délivré par le contrôleur LK est opposé à son action ce qui montre un fort rejet de toute déviation du centre de la voie. D'autre part, DA fournit un couple dans le même sens que celui du conducteur, ce qui l'aiderait dans sa manœuvre. La commande latérale finale fusionne la sortie des contrôleurs locaux en fonction de la variable σ (eq. 4.29). Par conséquent, plus σ tend vers zéro, plus le

comportement du système se rapproche de celui du contrôleur LK, ce qui signifie une action autoritaire qui maintient le véhicule au centre de la voie. Cela correspond à l'extrémité supérieure de LoHA. Au contraire, plus σ s'approche de 1 et moins le comportement du système serait autoritaire comme on peut le voir sur la figure 4.22 (b).

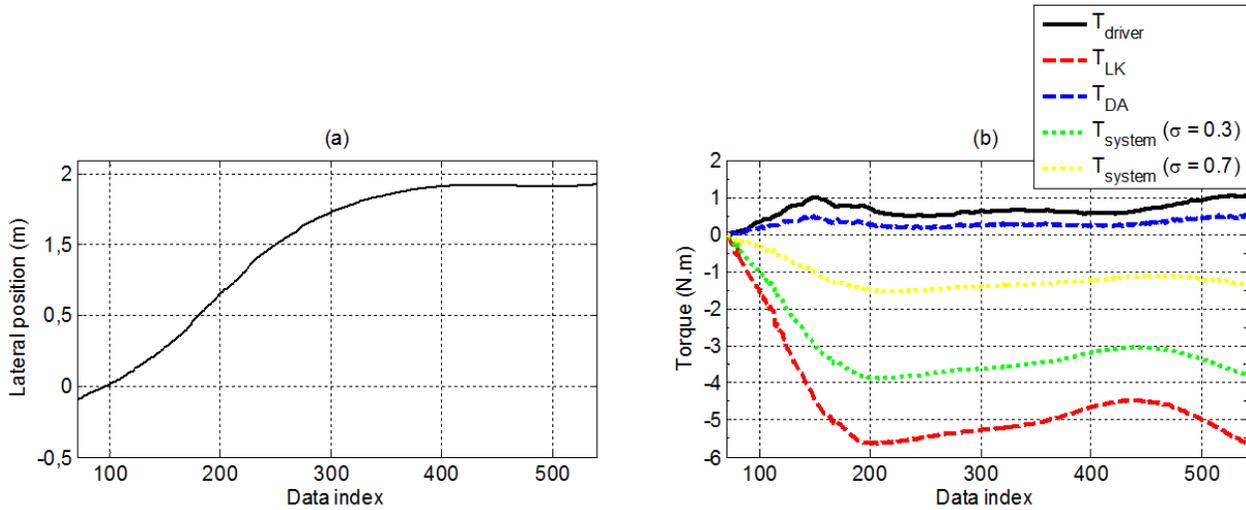


FIGURE 4.22 – (a) Trajectoire latérale du véhicule pour un écart vers la gauche (b) Couples du conducteur et du contrôleur pendant la manœuvre

4.3.5.3 Résultats avec la structure de contrôle partagé lors de la modification en ligne de la variable d'autorité

Dans ce paragraphe nous illustrons l'effet de la modification en temps réel de la variable d'autorité du conducteur (σ) sur le couple d'assistance du système.

Les résultats présentés correspondent à un enregistrement qui a été réalisé sur le simulateur SHERPA-LAMIH avec un conducteur à qui nous avons demandé d'effectuer une trajectoire sinusoïdale dans la voie (figure 4.23(a)) pendant que nous varions la variable σ . Nous pouvons distinguer différentes phases avec un transfert progressif de l'autorité entre le système et le conducteur (figure 4.23(b)).

La figure 4.23(c) affiche le couple du conducteur T_d et le couple du système T_s lors de ce test. Nous remarquons que le comportement du système vis à vis de l'intervention du conducteur change selon la valeur attribuée à la variable σ . En effet, dans les phases où l'autorité est du côté du système ($\sigma = 0$) il est plus difficile au conducteur de s'écarter du centre de voie sans fournir un couple important. Durant ces phases le couple du système est constamment opposé à celui du conducteur. Par ailleurs, lorsque l'autorité est attribuée au conducteur ($\sigma = 1$), ce dernier effectue plus facilement des écarts dans la voie. Cela se traduit par un faible couple de sa part pour réaliser ses manœuvres et un couple d'assistance qui va

4.3. La commande latérale pour le contrôle partagé

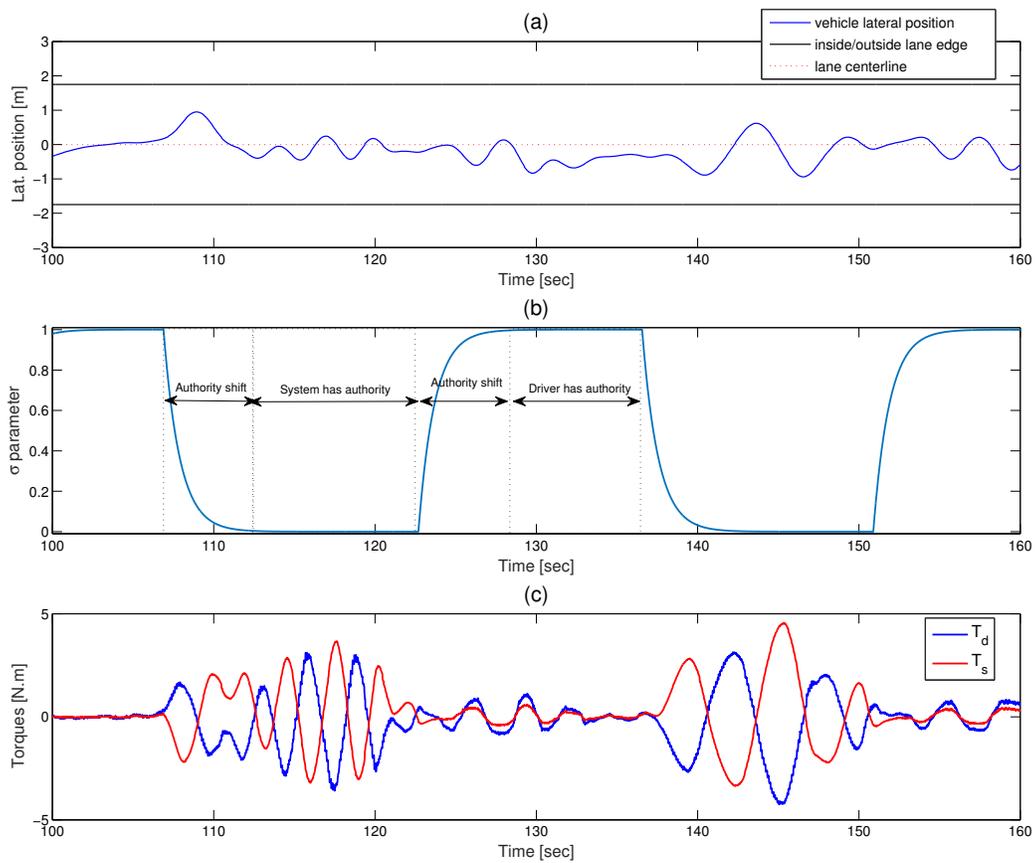


FIGURE 4.23 – (a) Trajectoire latérale du véhicule dans la voie ; (b) Variable d'autorité σ ;
(c) Couples du conducteur et du système au niveau du volant

dans son sens.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre sont présentés deux modules importants du bas niveau qui permettent la coopération au niveau de la trajectoire planifiée et au niveau de l'action du système.

Contrairement aux approches de planification classiques, le module de planification de trajectoire présenté intègre une fonctionnalité coopérative qui permet d'adapter la trajectoire du système en temps réel pour accommoder les actions du conducteur dans la mesure où celles-ci respectent la dynamique du véhicule et ne mènent pas vers des collisions. Ce module fait l'objet d'une étude expérimentale dans le chapitre suivant.

L'architecture de contrôle latéral présentée permet au système de coopérer avec le conducteur au niveau opérationnel. Cela est possible grâce à la somme pondérée des sorties de deux contrôleurs locaux qui représentent à chacun une extrémité du spectre des niveaux de l'autorité haptique (LoHA). La valeur de la pondération est directement liée à l'autorité accordée au conducteur et en fonction de celle-ci l'action du système peut se montrer complaisante avec le conducteur ou au contraire rejeter son action au niveau du volant. A l'aide de cette approche, une étude expérimentale étudiant l'impact de l'adaptation en ligne du LoHA sur la performance de conduite ainsi que l'acceptabilité a été menée (§5.3).

Chapitre 5

Évaluation expérimentale des concepts de coopération

5.1 Introduction

Des études expérimentales sont essentielles pour valider les principes de coopération Homme-Machine proposés dans le cadre de cette thèse.

Dans un premier temps, ces études serviront de base pour mieux appréhender les formes de coopération à chaque niveau de la conduite et à terme, apporteront des éléments de réponse à la question : "*Quand et comment coopérer ?*".

Avec l'objectif d'évaluer les avantages de coopérer à chaque niveau de la tâche de conduite nous avons abordé deux points principaux :

- Les avantages de modifier en temps réel le degré de l'autorité haptique du système pour s'adapter à la situation
- Les avantages de modifier la trajectoire planifiée du système pour accommoder les actions du conducteur

Cela a donné lieu à deux expérimentations sur simulateur que nous exposerons au long de ce chapitre.

5.2 Simulateur de conduite SHERPA-LAMIH

Comme il a été montré dans la littérature [253], la validité des résultats d'études comportementales sur la conduite menées sur simulateur dépend du degré de réalisme. Les simulateurs à base mobile sont préconisés dès que l'on s'intéresse au contrôle latéral et longitudinal du véhicule. A cet effet, les études que nous avons menées et les étapes de validation des algorithmes ont eu lieu sur le simulateur de conduite immersif SHERPA-LAMIH présenté sur la figure 5.1. Il se compose d'une cabine de voiture de modèle Peugeot 206 installée sur une plateforme de mouvement à six degrés de liberté restituant les mouvements du véhicule et qui reproduit dans une certaine mesure les sensations d'accélération et de vitesse. La cabine permet d'accueillir de vrais équipements automobile interfacés avec la couche logicielle. En outre, le simulateur est équipé d'un volant actionné et de capteurs au niveau de la colonne de direction qui fournissent l'angle, la vitesse ainsi que le couple de braquage. Une pédale d'accélérateur active à retour d'effort est également installée. Deux systèmes de surveillance du conducteur équipent le simulateur. Une solution industrielle commercialisée par "CONTINENTAL AUTOMOTIVE" et le système **Facelab** de "Seeing Machines Inc". Le retour visuel est projeté sur un écran offrant une vue panoramique qui s'étend sur 240° de large. Le simulateur SHERPA-LAMIH utilise le logiciel de simulation automobile *SCANeR* développé par *OKTAL*. Ce dernier fournit un environnement de simulation très réaliste qui reproduit d'une manière riche la dynamique du véhicule comme le couple d'auto-alignement en tenant compte d'une grande variété de paramètres tel que la météo, l'adhérence et l'état de surface de la route.

Le simulateur offre la possibilité d'utiliser deux environnements de développement : *RT-maps (INTEMPORA)* et *Matlab / Simulink*. Étant une solution de prototypage flexible et rapide, ce dernier a été utilisé pour implémenter les développements présentés dans ce manuscrit.



FIGURE 5.1 – Le simulateur de conduite SHERPA-LAMIH

5.3 Etude 1 : L'adaptation en temps-réel du degré d'autorité haptique (LoHA)

Les avantages de modifier en temps réel le degré de l'autorité haptique du système pour s'adapter à la situation

5.3.1 Introduction

Il a déjà été démontré que le contrôle partagé haptique est bénéfique pour améliorer la performance de contrôle tout en réduisant l'effort de contrôle que le conducteur devrait fournir. Décrit comme un spectre continu reliant la conduite autonome et la conduite manuelle certaines études à l'instar de [123] [122] se sont fixé comme objectif de déterminer le degré d'autorité haptique (LoHA) optimal afin d'assister le conducteur. Cela s'avère cependant ardu car ce niveau change en fonction de la situation, notamment dans [123]. Cette étude a porté sur l'évaluation de la performance de la conduite avec différents niveaux de LoHA. Parmi les résultats intéressants, notons celui qui tend à montrer que le LoHA assurant les meilleures performances de conduite augmente dans des conditions où le retour d'information visuelle de la scène de conduite est réduit notamment avec une condition de conduite dans le brouillard. Par ailleurs, malgré l'existence de nombreuses approches de commande permettant de changer ce niveau en ligne, les preuves appuyant l'efficacité et l'acceptabilité de cette approche font défaut. A cet effet, il est intéressant d'étudier les effets de l'adaptation en temps réel du LoHA sur la performance de conduite et sur le ressenti subjectif que cette modification pourrait apporter.

Ce contexte nous a motivé à conduire une expérimentation afin d'évaluer l'impact de l'adaptation en temps réel du niveau d'assistance haptique en fonction de l'état du conducteur. L'objectif est d'explorer l'idée de l'utilisation de l'information de la distraction et de la fatigue du conducteur afin de moduler en ligne le niveau d'autorité d'un système de contrôle partagé haptique. Ce dernier fournit un retour haptique continu sur le volant pour l'assistance au maintien de voie. En raison de la nature adaptative du système, nous l'appelons **ALKA** (i.e Adaptive Lane Keeping Assist). Une comparaison a donc été faite avec la conduite manuelle en tant que référence et avec un système d'assistance ayant un degré d'autorité haptique fixe qui sera appelé le long du document **LKA** (i.e Lane Keeping Assist). Une expérimentation préliminaire dont les résultats sont publiés dans [254] à été réalisée afin de valider le protocole de l'expérimentation finale présentée dans cette thèse.

5.3.2 Méthode

5.3.2.1 Matériels

L'expérimentation s'est déroulée autour du simulateur de conduite SHERPA-LAMIH présenté dans la section 5.2. La plateforme a été mise en mouvement afin de restituer les la dynamique du véhicule au cours de l'expérimentation. Cela est d'une grande importance car des résultats d'études antécédentes ont montré l'influence du réalisme du simulateur de conduite sur le comportement du conducteur en mettant l'accent sur l'importance de la largeur du champ visuel et de la restitution du mouvement qui permettraient d'améliorer la perception des vitesses et des accélérations latérales [255]. En outre, il a été démontré dans [256] que le choix du type de simulateur avait un impact direct sur les résultats obtenus lors de l'étude de systèmes d'aide à la conduite et particulièrement au maintien de voie. En effet, grâce à l'amélioration de la perception de la dynamique du véhicule obtenue avec les simulateurs dynamiques, les conducteurs adopteraient un comportement plus proche de la réalité ce qui joue en faveur de la validité des résultats obtenus.



FIGURE 5.2 – Positionnement de la tablette pour la tâche secondaire

Pour les besoins de l'étude une tablette 10 pouces de type "Galaxy Tab" a été utilisée pour la tâche secondaire comme montré sur la figure 5.2. Par ailleurs, le système Facelab a été utilisé pour la supervision de l'état de distraction et de vigilance des conducteurs.

5.3.2.2 Les systèmes *LKA* et *ALKA*

Les deux systèmes présentés dans ce qui suit sont basés sur l'approche de commande présentée dans la section 4.3. Seul le choix de la variable d'autorité σ (se référer à l'équation 4.29) change entre les deux systèmes *LKA* et *ALKA*.

Le système *LKA* Afin de définir la valeur de σ et de déterminer le meilleur LoHA, degré de l'autorité haptique fixe, nous avons suivi les recommandations des travaux présentés

dans [162], [147] et [123]. Une étude préliminaire suivant l'étude expérimentale dans [123] a été réalisée. L'objectif était d'obtenir un LoHA qui offrirait suffisamment d'assistance pour améliorer significativement la performance de maintien de la voie tout en assurant un bon sentiment de contrôle au conducteur et éviter un retour haptique trop autoritaire. En expérimentant avec plusieurs de valeurs σ , notre choix s'est porté sur une valeur de $\sigma = 0.7$ étant celle qui répondait au mieux aux critères susmentionnés.

Ce paramètre a donné lieu à un système LKA produisant un contrôle "mou" du véhicule en l'absence de l'action du conducteur sur le volant mais dont la présence était parfaitement perceptible lors du contrôle partagé. Il va sans dire que cette configuration n'est qu'une assistance au maintien de voie et n'est en aucun cas destinée à une conduite "autonome". La performance de maintien de voie du LKA sans intervention du conducteur est rapportée dans la section des résultats.

Le système ALKA Comme son nom l'indique, l'ALKA s'appuie sur l'adaptation en temps réel de la variable d'autorité σ . Elle est calculée en permanence en fonction de l'état du conducteur et du risque de sortie de voie. Lorsque le conducteur est attentif et qu'il n'y a pas de risque de sortie de voie, l'autorité de contrôler le véhicule lui revient. Dans ce cas, σ tend vers 1 et le couple délivré par le système au volant sera principalement la sortie du contrôleur DA (voir eq. 4.29) ce qui correspond à une conduite manuelle avec une assistance à la direction. D'autre part, σ tend vers 0 quand l'état du conducteur se détériore ou quand un départ de voie est imminent. Dans ce cas le système reprend l'autorité et la sortie du contrôleur LK serait prédominante dans le couple délivré par le système montrant ainsi plus d'autorité pour garder le véhicule au centre de la voie. Ce faisant, le système fournit une assistance haptique au maintien de voie qui est adaptative car elle suit l'évolution de l'état du conducteur. Les performances de suivi de voie du contrôleur LK (autonome) sont également incluses dans la section des résultats.

5.3.2.3 Participants

Quinze participants (13 hommes, 2 femmes) d'un âge moyen de 34 ± 10 ans ont participé à l'étude. Tous étaient des conducteurs expérimentés et avaient en moyenne 16 ± 9 années d'expérience de conduite. Ils ont rapporté un kilométrage annuel moyen de 19 270 km. Aucun d'entre eux n'était habitué à écrire des messages en conduisant. Les données de deux participants ont été écartées de l'analyse en raison d'un dysfonctionnement du système de surveillance du conducteur.

5.3.2.4 Protocole

L'étude a été menée sur une route à deux voies qui s'étend sur 4,5 kilomètres. Le circuit est composé d'une disposition aléatoire de sections droites et de virages de longueurs et de

courbures variables. Il n’y avait pas de véhicules de trafic et aucun changement de voie n’était nécessaire pendant tout le scénario de test. Les conducteurs ont reçu l’instruction de toujours conduire sur la voie de droite.

Sachant que la performance du guidage latéral et le choix de vitesse sont interdépendants [147], et étant donné que l’expérimentation porte sur l’étude du contrôle latéral du véhicule, la décision de fixer la vitesse a été prise afin d’éviter une variabilité du choix de la vitesse qui pourrait compliquer les comparaisons entre les participants. La conduite est ainsi réalisée avec un régulateur de vitesse (Cruise Control) qui garde le véhicule à une vitesse de 70 *km/h*.

Les participants ont reçu une brève description de l’expérimentation. Après leur avoir demandé leur consentement pour participer à l’étude, ils ont eu une présentation du simulateur de conduite et des systèmes à tester ainsi que des protocoles de sécurité. Pour chaque conducteur, une phase de familiarisation avec le simulateur de conduite a été effectuée. Dans trois essais différents, ils ont testé la conduite manuelle, la conduite avec le système *LKA* et enfin la conduite avec le système *ALKA*. Cette phase s’est déroulée en présence d’un expérimentateur pour répondre aux questions éventuelles qu’ils pourraient avoir. La familiarisation a eu lieu sur un circuit spécifique et a duré 4 minutes par essai. À la fin de cette phase, l’expérimentateur a expliqué la tâche secondaire.

Suite à la familiarisation, l’étude s’est déroulée en trois étapes. L’une a été réalisée en conduite manuelle tandis que les deux autres ont été réalisées avec les deux systèmes *LKA* et *ALKA*. L’ordre a été contrebalancé afin d’éviter un effet d’ordre. Pour ces trois étapes, le scénario consistait à conduire sur une route nationale tout en restant à droite et arrivé sous un panneau à message variable (PMV) les participants devaient procéder à la tâche secondaire.

Le scénario est donc divisé en deux parties : Une tâche de conduite normale où les conducteurs n’avaient que la tâche primaire de conduite à effectuer. Dans la suite du texte nous référons à cette phase par l’abréviation **No ST** (conduite sans tâche secondaire). L’autre partie de l’essai est caractérisée par une conduite avec tâche secondaire **ST**. Le début de la phase de tâche secondaire est donc marqué par un PMV invitant les conducteurs à entreprendre l’écriture d’un message textuel (figure 5.3). La tâche secondaire consistait à lire et recopier un court message sur la tablette tout en conduisant. Le message à recopier se trouvait sur la même fenêtre de l’éditeur de texte. Les textes proposés contenaient 130 caractères sans majuscules ni ponctuation pour faciliter l’évaluation de la performance de la tâche secondaire. Le texte à recopier était différent à chaque essai. La tablette était placée sur le côté droit du siège conducteur de manière à ce que, lorsqu’on est engagé dans la tâche secondaire, on ne peut surveiller la scène de conduite tel qu’illustré sur la figure 5.2.



FIGURE 5.3 – Illustration du scénario de test lorsque les conducteurs arrivaient sur le PMV

5.3.2.5 Analyse de données

La performance de conduite a été évaluée par le biais de mesures objectives. De plus, les participants ont renseigné un questionnaire pour rapporter leurs évaluations subjectives à la fin de chaque étape.

Les quatre premiers indicateurs objectifs utilisés évaluent la performance de maintien de voie. Nous nous sommes basés sur des indicateurs largement employés dans la littérature à cet effet. Premièrement, l'écart-type de la position latérale (STandard Deviation of Lateral Position : **STDLP** (m)) et le taux d'inversion de l'angle au volant (Steering wheel Reversal Rate : **SRR** (s^{-1})) sont connus pour être corrélés avec une distraction visuelle ou une charge cognitive élevée [257]. Traduisant l'instabilité du guidage du véhicule des valeurs faibles de ces deux indicateurs indiquent des performances de conduite améliorées. D'autre part, la position latérale moyenne (Mean Lateral Position : **MLP** (m)) est liée à la position latérale préférée dans la voie ainsi que le comportement du conducteur lors de la négociation des virages (sous-virage où sur-virage). Le MLP représente donc la distance entre le centre de la voie et le centre du véhicule. Un signe négatif signifie un écart vers la droite du centre de la voie. Enfin, l'erreur quadratique moyenne de la position latérale (Root Mean Square Error : **RMSE** (m)) a été utilisée pour caractériser l'erreur de positionnement latéral par rapport au centre de la voie au cours du scénario.

Par ailleurs, l'effort de guidage du conducteur (Steering Effort : **StE** ($N.m$)²) a été calculé pour évaluer l'effort global que fournit le conducteur pour contrôler son véhicule. Ce dernier est calculé par l'intégrale du carré du couple du conducteur sur la durée du scénario.

Pour finir, la performance de la tâche secondaire (Secondary Task Performance : **STP**)

a été calculée en faisant la différence entre le nombre de caractères correctement écrits et le nombre d'erreurs.

En ce qui concerne l'évaluation subjective, il a été demandé aux participants d'évaluer la conduite en fonction de leurs sentiments de confort, de sécurité, de qualité de contrôle et de charge de travail sur une échelle allant de 0 (pire) à 100 (meilleur). A la fin de chaque scénario, un questionnaire a été fourni et les participants ont répondu sur la même feuille pour les trois stratégies (Manuel, LKA et ALKA).

Pour l'analyse des données, une analyse de la variance à deux mesures répétées (ANOVA) a été réalisée en considérant deux variables indépendantes : la tâche de conduite (NO ST, ST) et la stratégie (Manuel, LKA, ALKA). Les mesures dépendantes sont : le SRR, le STDLP, le MLP, le RMSE et le StE. Pour le STP, une ANOVA à mesures répétées à sens unique a été exécutée. Le test de Bonferroni a été utilisé comme analyse post-hoc des résultats. Les résultats avec $p < 0,05$ sont considérés comme significatifs.

5.3.3 Résultats

5.3.3.1 Les résultats objectifs

La figure 5.4 montre les effets de la stratégie (Manuel, LKA, ALKA) et des conditions de la tâche de conduite (NO ST, ST) sur les métriques de maintien de voie.

Les résultats du taux d'inversion de l'angle au volant (SRR) sont indiqués sur la figure 5.4 (a). Les moyennes ainsi que les écarts-types sont indiqués pour toutes les conditions de la tâche de conduite et de la stratégie. A droite de la figure sont reportés le SRR pour une conduite entièrement autonome avec le contrôleur LK uniquement (se référer à la section 4.3) et pour le système LKA seul sans l'intervention d'un conducteur.

L'ANOVA a révélé un effet significatif de la stratégie sur le SRR ($F(2, 24) = 7,7424; p = 0,00254$), un effet significatif de la tâche de conduite ($F(1, 12) = 13,3373; p = 0,00331$), et une interaction significative entre les deux variables ($F(2, 24) = 22,7129; p < 0,0001$). Pendant la condition de conduite normale (NO ST), la stratégie LKA a donné le SRR le plus bas par rapport aux autres stratégies (une réduction de 16% par rapport à la conduite manuelle). Pour l'ALKA, le SRR était légèrement supérieur à la stratégie Manuel. Cependant, le test post-hoc de Bonferroni a montré que cette différence n'atteignait pas le seuil de la signification statistique.

Sous la condition de la tâche secondaire (ST), les différences entre les trois stratégies sont clairement plus apparentes (voir la figure 5.4 (a)). Sous cette condition, le SRR a été multiplié par 2 environ pour la stratégie Manuel. Le LKA a significativement réduit le SRR par rapport au Manuel ($p = 0,0116$). De plus, l'ALKA a significativement réduit le SRR par rapport au Manuel ($p < 0,0001$) et au LKA ($p = 0,0051$). Nous soulignons le fait que le SRR

obtenu avec la conduite autonome était le plus bas par rapport à toutes les autres conditions.

Les résultats sur la variabilité de la position latérale (STDLP) sont exposés sur la figure 5.4 (b). L'ANOVA pour cette métrique a également montré un effet significatif de la stratégie ($F(2, 24) = 31,7698; p < 0,0001$), un effet significatif de la tâche de conduite ($F(1, 12) = 21,6057; p = 0,00056$), et une interaction significative entre les deux variables ($F(2, 24) = 20,2484; p < 0,0001$). Les résultats suivent la même tendance que pour la métrique précédente. Dans l'absence d'une tâche secondaire (NO ST), le LKA a donné le STDLP le plus bas comparé au Manuel (une réduction de 20%) tandis que le ALKA présentait des résultats à peu près similaires. Cependant, les tests post-hoc n'ont pas révélé de signification statistique.

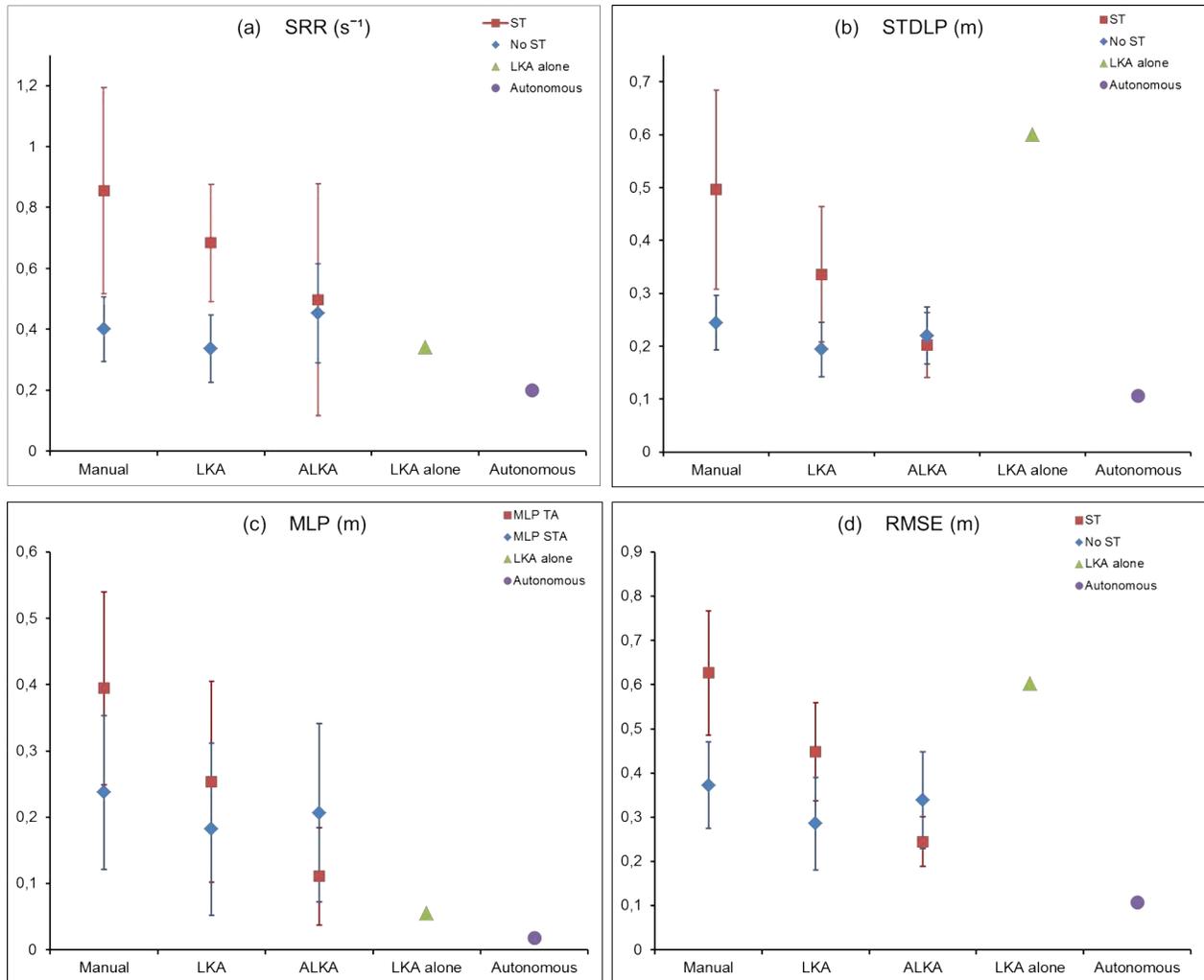


FIGURE 5.4 – Résultats objectifs : Moyenne sur les participants du (a) SRR ; (b) STDLP ; (c) MLP ; (d) RMSE et la performance de la conduite autonome et de la LKA seule. Les barres d'erreur représentent l'écart-type

D'autre part, les résultats dans la condition ST ont révélé des différences significatives. La variabilité de la position latérale a presque doublé pour la stratégie Manuel dans cette condition par rapport à la conduite normale. La stratégie LKA a permis une diminution significative de la variabilité par rapport au Manuel ($p = 0,00027$).

En outre, ALKA s'est avéré être la stratégie qui a le plus réduit le STDLP par rapport au Manuel ($p < 0,0001$) et au LKA ($p = 0,00261$). Nous avons noté qu'aucune différence statistique n'a été trouvée entre le STDLP pour le ALKA dans les conditions ST et la conduite manuelle sous la condition normale (NO ST). En outre, nous soulignons les faibles performances du LKA sans intervention du conducteur et que la conduite autonome garantit la plus faible variabilité de la position latérale par rapport à tous les autres cas étudiés.

L'ANOVA réalisée sur la position latérale moyenne (MLP) a révélé un effet significatif de la stratégie ($F(2, 24) = 16,4130; p < 0,0001$). Bien que l'influence de la condition de la tâche de conduite n'ait pas été jugée significative ($F(1, 12) = 2,2093; p = 0,162978$), l'interaction entre les deux variables indépendantes a atteint une signification statistique ($F(2, 24) = 12,0872; p = 0,00023$). La figure 5.4 (c) présente les résultats pour les différentes conditions d'essai pour MLP. Les corrections de Bonferroni n'ont pas établi de différence statistique pour les trois stratégies en l'absence de tâche secondaire malgré la nette diminution du MLP avec le LKA par rapport aux autres stratégies (une réduction de 29% par rapport au Manuel). Au contraire, les tests post-hoc ont révélé une différence claire et significative entre les trois stratégies lorsque les conducteurs étaient engagés dans la tâche d'écriture du message. Alors que le LKA a entraîné une diminution significative du MLP par rapport au Manuel ($p = 0,00392$), la stratégie ALKA a réduit encore plus (de façon significative) le MLP par rapport à la stratégie Manuel ($p < 0,0001$) et par rapport au LKA également ($p = 0,04299$). Le LKA conduisant seul a produit une faible valeur du MLP et la conduite entièrement autonome a donné une position latérale moyenne très proche de zéro.

Les résultats pour l'erreur quadratique moyenne de la position latérale (RMSE) sont représentés sur la figure 5.4 (d). L'ANOVA effectuée sur cette dernière métrique de maintien de voie a établi un effet significatif de la stratégie ($F(2, 24) = 47,3918; p < 0,0001$), un effet significatif de la tâche de conduite ($F(1, 12) = 18,2795; p = 0,001078$), et une interaction significative entre les deux variables ($F(2, 24) = 29,8559; p < 0,0001$). Comme pour les mesures précédentes, le LKA a donné la plus petite moyenne du RMSE par rapport à la stratégie Manuel (une réduction de 23%) et au ALKA pour la condition NO ST. Cependant, ces différences n'ont pas atteint la signification statistique. En outre, des tests post-hoc ont clairement confirmé un effet significatif de la stratégie au cours de la condition ST. Alors que le RMSE a augmenté de près de 100% avec la stratégie Manuel pour cette condition par rapport à la conduite normale, le ALKA a donné la moyenne la plus faible du RMSE

comparativement aux autres stratégies (Manuel ($p < 0,0001$) et LKA ($p < 0,0001$). Il est à noter que le LKA a également réduit de manière significative le RMSE par rapport au contrôle manuel sous cette condition ($p = 0,00022$). Enfin, la même tendance est observée pour le LKA seul, ce qui conduit à de grandes déviations de la trajectoire réalisée et à la conduite autonome qui garantit les plus petites erreurs de positionnement relativement à tous les autres cas.

En ce qui concerne l'effort de guidage (StE), l'ANOVA a révélé un effet significatif de la stratégie ($F(2, 24) = 8,5727, p = 0,00155$), un effet significatif de la tâche de conduite ($F(1, 12) = 39,6123; p < 0,0001$), et une interaction significative entre les deux variables ($F(2, 24) = 9,1314; p = 0,00112$). Les résultats pour le StE sont indiqués sur la figure 5.5. En condition de conduite normale (NO ST), LKA et ALKA ont réduit l'effort de direction nécessaire pour contrôler le véhicule dans la voie par rapport au Manuel ($p < 0,0001$) respect. ($p < 0,0001$). Ils ont permis une réduction de l'effort de respectivement 53% et 50%. Pour la condition ST, malgré le fait que le LKA a donné la plus petite valeur de l'effort de guidage sur toutes les stratégies, la différence n'était significative que par rapport au ALKA ($p = 0,00338$). Dans cette condition, l'ALKA a augmenté l'effort de guidage par rapport aux autres stratégies.

Enfin, l'analyse ANOVA à mesures répétées à sens unique réalisée pour la performance de tâche secondaire (STP) a révélé un effet significatif de la stratégie ($F(2, 24) = 5,3218; p = 0,01221$). La figure 5.6 rapporte les résultats de STP pour les trois stratégies. Le meilleur score du STP a été obtenu avec la stratégie ALKA. Les tests post-hoc ont montré que le STP avec ALKA était significativement plus élevé que le Manuel ($p = 0,01606$). Aucune différence statistique n'a été trouvée ailleurs.

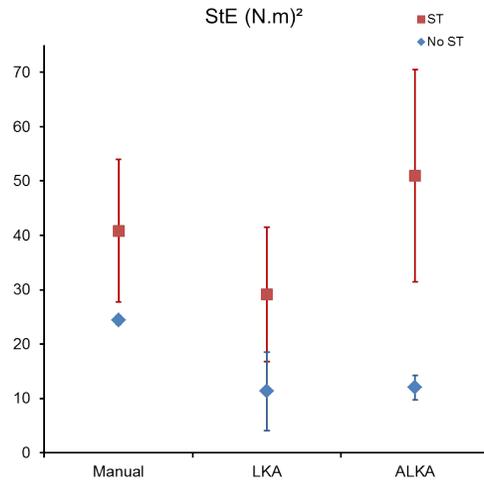


FIGURE 5.5 – L’effort de guidage (StE) pour les différentes conditions. Les barres d’erreur représentent l’écart-type

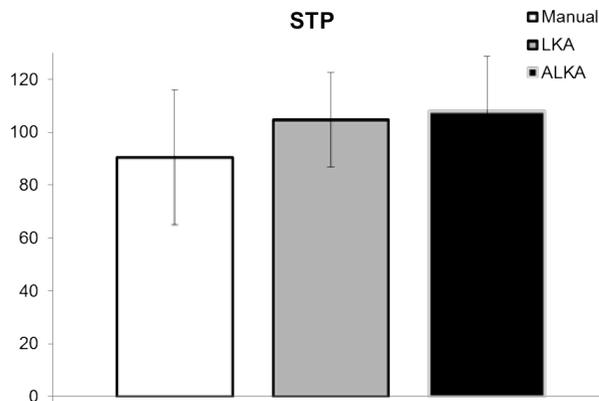


FIGURE 5.6 – La performance de la tâche secondaire (STP). Les barres d’erreur représentent l’écart-type

5.3.3.2 Les résultats subjectifs

Les résultats subjectifs sont exposés sur la figure 5.7. Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été réalisée pour étudier la signification des résultats subjectifs. Des influences significatives de la stratégie, de la tâche de conduite et de l’interaction des deux ont été trouvées pour tous les indicateurs subjectifs. Les résultats sont reportés dans le tableau 5.1. Une analyse post-hoc utilisant des corrections de Bonferroni a également été effectuée pour des comparaisons supplémentaires. Aucune différence significative par rapport aux stratégies n’a été notée entre les évaluations subjectives de toutes les métriques pour la condition No ST (figure 5.7 (a)). Cependant, l’influence de la stratégie a été marquée au cours de la

condition ST comme représenté sur la figure 5.7 (b). À l'exception de la charge de travail ($p = 0,075275$), LKA a permis d'améliorer significativement le sentiment de confort ($p = 0,00042$), la sécurité ($p = 0,00708$) et la qualité du contrôle ($p = 0,00829$) par rapport au manuel. Dans cette condition, ALKA améliore encore plus les sentiments subjectifs sur toutes les métriques par rapport au LKA : confort ($p = 0,024$), sécurité ($p = 0,00038$), qualité de contrôle ($p < 0,0001$) et charge de travail ($p = 0,00152$).

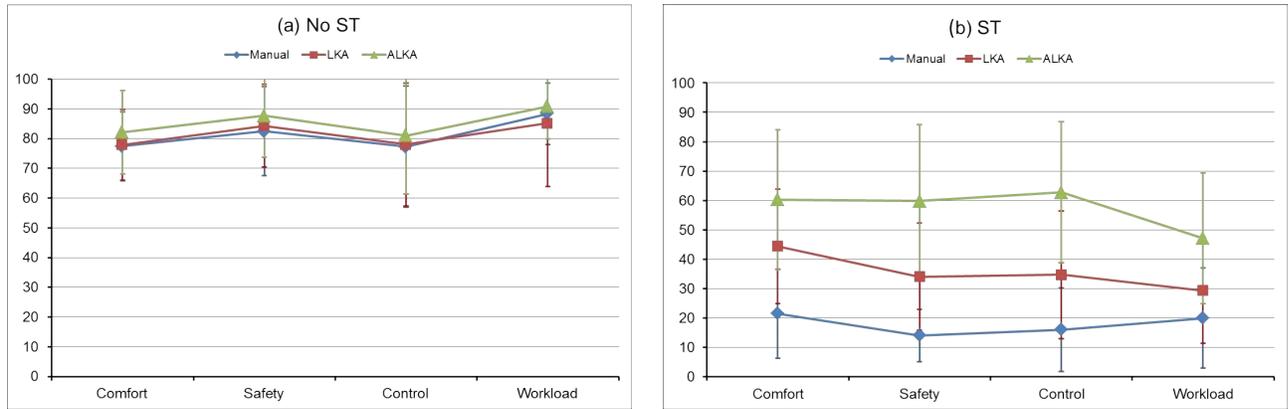


FIGURE 5.7 – Résultats subjectifs : Comparaison entre Manuel, LKA et ALKA dans la phase : (a) sans tâche secondaire ; (b) avec la tâche secondaire

Indicateurs	Variables indépendantes et leurs interactions		
	Stratégie	Tâche de conduite	Interaction
Confort	$F(2,24)=20,1434; p<0.0001$	$F(1,12)=49,3900; p<0.0001$	$F(2,24)=29,7194; p<0.0001$
Sécurité	$F(2,24)=29,7194; p<0.0001$	$F(1,12)=77,0649; p<0.0001$	$F(2,24)=16,8444; p<0.0001$
Qualité de contrôle	$F(2,24)=19,5735; p<0.0001$	$F(1,12)=40,0937; p<0.0001$	$F(2,24)=20,9521; p<0.0001$
Charge de travail	$F(2,24)=16,6627; p<0.0001$	$F(1,12)=88,7655; p<0.0001$	$F(2,24)=12,3063; p=0,00021$

TABLE 5.1 – Résultats de l'ANOVA pour les indicateurs subjectifs

5.3.4 Discussions

Les résultats objectifs ont montré que dans les conditions normales de conduite (NO ST) et puisque les conducteurs étaient focalisés sur la route, les stratégies Manuel et ALKA étaient similaires et ont donné des résultats très proches. Le MLP est resté le même, ce qui suggère que les conducteurs ont gardé leur comportement de conduite normal en ce qui concerne le positionnement latéral dans la voie et la négociation de virages. Pour ces deux stratégies, tous les conducteurs ont eu tendance à conduire légèrement à gauche du centre de la voie. De plus, l'ALKA a permis de réduire l'effort de guidage grâce à l'effet

direction assistée du contrôleur DA qui amplifie le couple du conducteur. En outre, durant cette condition (NO ST), la stratégie LKA a permis d'améliorer les quatre indicateurs de performance, qui ont indiqué moins de variabilité sur les actions des conducteurs et sur la trajectoire du véhicule, un positionnement plus proche du centre de la voie et une réduction de l'erreur de positionnement. Ces avantages ont été obtenus avec un effort de direction moindre. Ceci suggère que pour cette condition de tâche de conduite, le LKA était la meilleure stratégie avec le retour haptique fixe et continu. Ces résultats sont en accord avec les résultats d'études antérieures [147][123]. Par conséquent, la leçon que nous tirons est que le LoHA adaptatif de l'ALKA devrait avoir une limite inférieure égale à celle du LKA afin d'observer les mêmes avantages durant des conditions de conduite normales. Ce qui signifie que dans notre conception, la variable d'autorité σ dans Eq. 2 (voir la section 2.1.2) ne devrait pas dépasser 0,7.

Toutefois, sous cette condition de conduite, la stratégie n'a pas influencé les résultats subjectifs car les évaluations des sentiments de confort, de sécurité et de contrôle étaient à peu près les mêmes pour toutes les stratégies à savoir : Manuel, LKA et ALKA.

Des résultats plus intéressants ont été relevés lors de la condition de la tâche secondaire (ST) à la fois sur les résultats objectifs et subjectifs. Les indicateurs objectifs ont montré une amélioration significative des performances de conduite avec le système ALKA et avec le LKA dans une certaine mesure. Le STDLP a diminué indiquant moins de variabilité dans la position latérale. D'autre part, le MLP a révélé que la conduite avec l'ALKA pendant la tâche secondaire aidait à maintenir la position latérale du véhicule plus près du centre de la voie par rapport aux autres stratégies. De plus, des cas dangereux de sorties de voie ont été constatés avec la stratégie Manuel. Pendant qu'ils se livraient à la tâche secondaire, certains conducteurs ont quitté la voie et se sont retrouvés sur la voie adjacente et dans certains cas sur le bas côté de la route. Aucun cas de ce genre n'est arrivé lorsque les participants ont conduit avec le LKA et l'ALKA.

En outre, le LKA a réduit considérablement l'effort de guidage mis par les participants tandis que l'ALKA a entraîné une augmentation significative du StE. Cette mesure a divisé les participants en deux populations sous la stratégie ALKA. En effet, le StE a diminué pour certains participants alors qu'il a montré une augmentation notable pour d'autres. Un résultat similaire ont été rapporté dans [147][123] où l'effort de guidage a augmenté avec un niveau de LoHA très autoritaire. Cela soulève la question du niveau d'autorité haptique maximum à attribuer au système. Il est à noter que les conducteurs pour lesquels le StE a diminué avaient manifesté un comportement plus passif à l'égard de l'ALKA et se seraient laissés entraîner lorsqu'ils étaient engagés dans la tâche secondaire.

De plus, le SRR qui est lié à une activité de guidage plus réactive a atteint son plus bas

niveau avec le ALKA même s'il a également été réduit de manière significative avec LKA. Cependant, une plus grande variabilité sur cette métrique a été observée avec le ALKA. La variabilité notée dans le comportement envers le système pourrait être liée à une différence des niveaux d'adaptation entre les conducteurs et à la confiance qu'ils ont placée dans le système. Ceci suggère d'envisager des phases de familiarisation plus longues [258].

Par ailleurs, le niveau de confiance mis dans le système peut prendre du temps à se construire tel que rapporté par certains participants ce qui est en accord avec la littérature [259]. Selon les niveaux de confiance des comportements différents ont été constatés. En effet, certains conducteurs ayant eu une confiance "aveugle" dans le système, se sont entièrement fiés à l'action de guidage de ce dernier lorsqu'ils étaient engagés dans la tâche secondaire. D'autre part, certains participants alternaient des fixations très courtes (moins de 2 secondes) entre la tablette et la scène de conduite afin de superviser les actions du système. Cette catégorie a montré une plus mauvaise performance de conduite que la première. En effet, avec ce comportement, ces sujets ne bénéficiaient pas suffisamment de l'aide du système ALKA car ce dernier n'avait pas le temps de prendre pleinement le contrôle du véhicule qu'il devait déjà rendre l'autorité aux conducteurs lorsqu'ils ramenaient leur attention sur la route. Or, un tel comportement d'alterner rapidement le regard entre la tablette et la route a provoqué une distraction latente que le système ne prenait pas en considération lorsqu'il rendait la main sur la seule base d'avoir les yeux sur la route. Par conséquent, selon leurs stratégies de supervision les participants ont bénéficié différemment de l'assistance du système. Cela suggère que se baser uniquement sur la distraction instantanée pour gérer la transition de l'autorité a ses limites et dans ce cas de figure l'introduction d'un indicateur supplémentaire qui évaluerait une distraction moyenne pourrait être opportun. Cela a mis en évidence un élément clé dans la conception d'une automatisation adaptative et qui réside dans l'importance de bien concevoir le mécanisme selon lequel s'effectue l'adaptation de l'autorité du système.

Un autre facteur pouvant contribuer à la variabilité du SRR avec le ALKA pourrait être le niveau d'engagement dans la tâche secondaire. Nous avons noté que les conducteurs montraient des niveaux d'engagement différents. Cela a encouragé l'évaluation de la performance de la tâche secondaire (STP). Les résultats subjectifs dans la condition No ST ont mis en évidence la préférence des participants pour un retour haptique plus présent (fourni dans le cas de l'ALKA) lors de phases de forte distraction. Cela a également été soutenu par les scores de tâches secondaires qui étaient à leur plus haut niveau lorsque la stratégie ALKA a été utilisée.

Globalement, le système dans son réglage LoHA plus élevé (ALKA pendant la distraction du conducteur) offrait les meilleures performances de conduite, mais a entraîné des interférences négatives au niveau du volant lorsque le conducteur et le système "se sont battus"

pour le contrôle du véhicule. Cela s'est traduit par l'augmentation considérable de l'effort que les conducteurs ont fourni dans cette condition. Néanmoins, ce qui est intéressant est que ce LoHA qui pourrait être perçu comme autoritaire et intrusif dans des conditions normales de conduite semble être mieux reçu lorsque le besoin d'assistance du conducteur augmente suite à une forte distraction liée à une tâche secondaire difficile.

Enfin, les participants ont souvent qualifié l'ALKA comme *"le passager qui agit doucement sur le volant lorsque l'on est distrait"*. L'adaptation en ligne de l'autorité a été acceptée et les participants ont fourni un bon retour sur la logique de fonctionnement. Cette dernière suit les principes de l'automatisation adaptative [101] et permet au système de changer continuellement son comportement pour répondre au besoin d'assistance du conducteur sans une action explicite du conducteur sur l'IHM.

5.3.5 Conclusion

Il a déjà été montré que l'assistance haptique fixe et continue offrait de nombreux avantages dans des études précédentes. Il était donc intéressant d'aller plus loin et étudier s'il était pertinent d'adapter le niveau d'assistance haptique en ligne en fonction de l'évolution de la situation. La présente étude s'est penchée la question afin d'évaluer la façon dont l'ALKA, un système qui adapte en ligne son assistance haptique en fonction de l'état du conducteur, affecterait les performances de conduite et la sécurité. Elle était également destinée à apporter un éclairage quant à l'acceptation d'un tel système. A cette fin, une comparaison a été faite avec une stratégie de contrôle manuel prise comme référence et avec le LKA, un système qui fournit un niveau d'assistance haptique continu mais fixe tout au long de son utilisation. Cette comparaison a été effectuée sous deux conditions de conduite différentes : Une condition de conduite normale en se concentrant uniquement sur la tâche principale de conduite et une condition de conduite avec une tâche secondaire dans laquelle les conducteurs devaient écrire un message sur une tablette tactile.

Durant la condition de conduite normale les résultats étaient cohérents avec les études précédentes qui établissent les avantages d'un retour haptique fixe et continue pour l'assistance au maintien de voie. Par ailleurs, des résultats plus intéressants ont été trouvés au cours de la phase de tâche secondaire. L'évaluation de la tâche de conduite a révélé que l'adaptation du niveau d'autorité haptique du système d'assistance a permis d'améliorer la performance lorsque les conducteurs étaient engagés dans une tâche secondaire exigeante. Les rapports subjectifs avec ALKA ont corroboré ces résultats où une amélioration significative des sentiments subjectifs de confort, de sécurité, de contrôle et de charge de travail par rapport aux autres stratégies de contrôle a été révélée.

L'étude a révélé que le retour haptique qui peut être ressenti comme autoritaire et intrusif

dans des conditions normales de conduite est mieux perçu lorsque le besoin d'assistance du conducteur augmente à la suite d'une forte distraction liée à une tâche secondaire complexe.

Enfin, la possibilité d'utiliser la distraction du conducteur fournie par un système de surveillance du conducteur afin d'adapter l'assistance aux besoins du conducteur en évolution a été démontrée. Cependant, l'utilisation d'indicateurs adéquats pour adapter l'automatisation reste cruciale et devrait être étudiée de manière plus approfondie. Cela a mis en évidence l'importance d'une conception adéquate des mécanismes de gestion de l'autorité du système.

Pour conclure, cette étude nous a permis de répondre positivement à la première question essentielle que nous nous sommes posés qui est de montrer l'intérêt et la faisabilité de l'adaptation en temps-réel du degré d'autorité haptique (LoHA). Cette étude appuie également la prémisse posée dans le chapitre 2 concernant la coopération au niveau opérationnel.

5.4 Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

Les avantages de modifier la trajectoire planifiée du système pour accommoder les actions du conducteur

5.4.1 Introduction

Dans cette section une étude préliminaire a été menée afin d'évaluer l'approche de planification coopérative de trajectoire présentée dans la section 4.2. L'objectif étant d'apporter des preuves sur la faisabilité et l'intérêt de coopérer au niveau de la trajectoire avec un test utilisateur. Ce concept reste nouveau et aucune étude n'a évalué l'influence de la modification en temps réel de la trajectoire pour assister le conducteur au meilleur de notre connaissance.

5.4.2 Méthode

5.4.2.1 Matériels

L'étude s'est déroulée sur le simulateur SHERPA présenté précédemment dans la section 5.2.

5.4.2.2 Participants

Six participants ont pris part à l'expérimentation préliminaire. L'âge moyen était de 32 ± 10 ans. Tous étaient des conducteurs expérimentés et ont rapporté un kilométrage annuel moyen de 15000 *km*.

5.4.2.3 Protocole

Pour illustrer le concept de planification coopérative proposé dans la section 4.2, un court scénario d'évitement d'obstacles a été examiné. L'expérimentation se déroule sur une route droite à deux voies qui s'étend sur 4 *km*. Avec l'instruction de rester dans la voie, les conducteurs sont tenus d'éviter des véhicules arrêtés et placés de sorte à obstruer partiellement la voie. Des groupes de quatre véhicules constituent une situation comme le montre la figure 5.8.

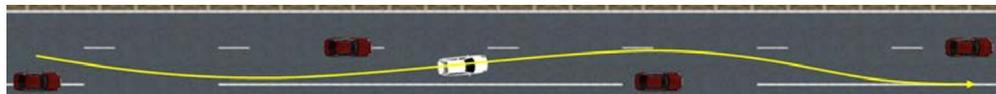


FIGURE 5.8 – Scénario : Évitement de collision avec des véhicules arrêtés de part et d'autre de la voie

Trois types de situations se distinguant par l'espacement entre les véhicules sont définies

5.4. Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

respectivement avec un espacement de : 150 m, 100 m et 50 m. 6 situations d'évitement au total ont été disposées de manière aléatoire sur le circuit de test.

Dans le cadre de l'expérience, les obstacles ne sont pas détectés par le système et les participants ont pour tâche d'effectuer des écarts dans la voie afin d'éviter les collisions en conduisant à une vitesse fixe de 90 km/h.

Deux instructions sont données à chaque participant :

- En ayant les bras tendus, tenir le volant avec les mains en position "10h10" tout au long de la phase de test ;
- Rester au mieux sur la voie de droite et éviter les véhicules arrêtés en faisant un écart au sein même de la voie (Fig. 5.8).

Avec le même scénario, les participants ont conduit avec trois stratégies : (i) Contrôle manuel (*Manual*), (ii) Un système classique de maintien de voie qui n'assure pas le partage de contrôle (*No Shared*) (le contrôleur suit uniquement le centre de la voie) et (iii) Un système de maintien de voie intégrant l'approche de planification coopérative proposée (*Shared*). Ces configurations sont testées dans un ordre aléatoire. Des questionnaires ont été fournis après chaque phase de test afin de recueillir une évaluation subjective de la conduite.

La phase de test a été précédée d'une courte familiarisation sur un circuit libre où chaque participant a pu expérimenter avec les différentes stratégies à savoir *Manual*, *No Shared* et *Shared*.

5.4.2.4 Analyse de données

L'analyse de données se décline en deux volets. D'une part, une évaluation objective basée sur des métriques pour l'analyse de l'interaction du conducteur avec le système ainsi que la qualité de contrôle.

L'interaction est évaluée par le biais des couples échangés au niveau du volant durant la phase de test. A cet effet, quatre indicateurs ont été analysés. Les deux premiers sont utilisés pour évaluer la cohérence entre les actions du conducteur et celles du système :

(i) La cohérence temporelle (*TiC* (%)) pour Time Consistency) qui représente le rapport entre le temps \mathcal{T}_c où l'assistance agit dans le même sens que le conducteur sur la durée totale du scénario \mathcal{T}_{sc} . Cette métrique est calculée par l'équation :

$$TiC = \frac{\mathcal{T}_c}{\mathcal{T}_{sc}} \tag{5.1}$$

$$\text{avec : } \mathcal{T}_c = \{t \in [0, \mathcal{T}_{sc}] \mid T_d(t).T_c(t) > 0\}$$

T_c et T_d sont les couples de l'assistance et du conducteur respectivement.

(ii) La cohérence de l'effort (**EfC** (%)) pour Effort Consistency), qui est le ratio de l'effort d'assistance dans le même sens que le conducteur sur l'effort total fourni par le système pendant la phase de test. Cette dernière est calculée par :

$$EfC = \frac{\int_{\mathcal{T}_c} T_c^2(\tau) d\tau}{\int_{\mathcal{T}_{sc}} T_c^2(\tau) d\tau} \quad (5.2)$$

(iii) L'effort de guidage total fourni par le conducteur (**StE** ($N.m^2$)) pour Steering Effort) :

$$StE = \int_{\mathcal{T}_{sc}} T_d^2(\tau) d\tau \quad (5.3)$$

(iv) Enfin, l'effort résistant total délivré par le système (**StR** ($N.m^2$)) pour Steering Resistance) :

$$StR = \int_{\mathcal{T}_r} T_c^2(\tau) d\tau \quad (5.4)$$

$$\text{avec : } \mathcal{T}_r = \{t \in [0, \mathcal{T}_{sc}] \mid T_d(t).T_c(t) < 0\}$$

La qualité du contrôle a été évaluée à l'aide du **SRR** (s^{-1}) présenté dans l'étude précédente (Section 5.3).

D'autre part, les questionnaires ont permis l'analyse des données subjectives. Cette dernière a consisté en quatre facteurs qui sont le sentiment de contrôle (**Control** (%)), le confort de la conduite (**Comfort** (%)), la facilité des évitements (**Easiness** (%)) et enfin une évaluation subjective de la performance de conduite globale (**Performance**) pour chaque phase de test. Les trois premières évaluations subjectives sont rapportées sur une échelle de 0 (pire) à 100 (meilleur) et la dernière consiste à simplement cocher l'une des trois options : Bonne, Moyenne ou Mauvaise.

Le test-T de Student pour échantillons appariés a été utilisé pour l'analyse statistique des données objectives et subjectives. Le seuil de significativité a été fixé à 0.05.

5.4.3 Résultats

5.4.3.1 Les résultats objectifs

La figure 5.9 montre les effets de la stratégie (Manual, No Shared, Shared) sur les métriques d'interaction au niveau du volant.

5.4. Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

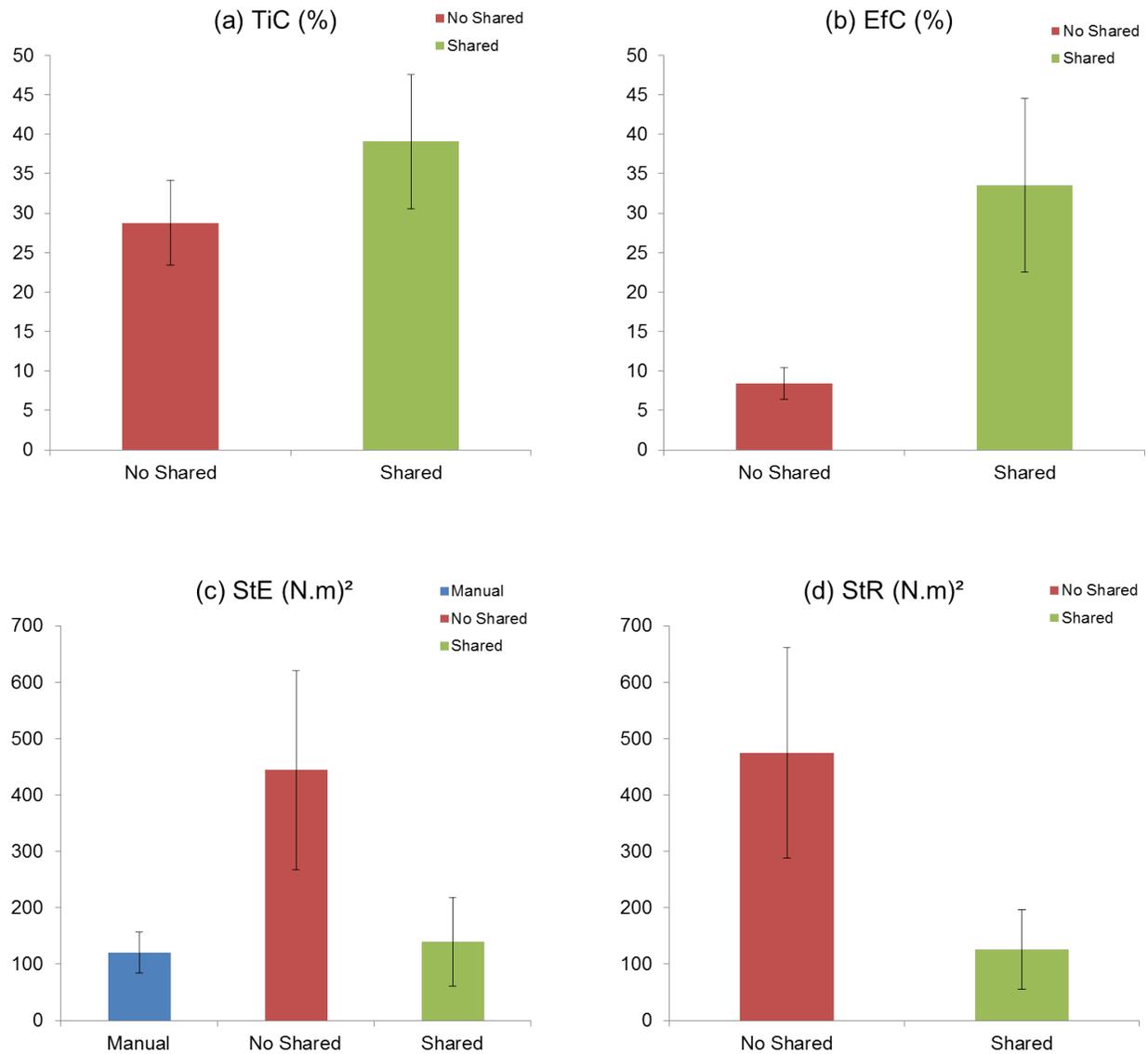


FIGURE 5.9 – Résultats objectifs de l'interaction au niveau du volant : Moyennes et écarts types de la : (a) Cohérence temporelle (TiC), (b) Cohérence de l'effort (EfC), (c) Effort de braquage (StE) et (d) Effort de résistance (StR)

La Figure 5.9(a) montre la cohérence temporelle des actions du conducteur et celles du système pendant la phase de test sous les deux conditions *No Shared* et *Shared*. Le test-T a révélé une augmentation significative de la cohérence temporelle sous la condition *Shared* comparé à la condition *No Shared* ($p = 0.03$).

La cohérence de l'effort est représentée sur la figure 5.9(b). Les résultats montrent une claire augmentation de la cohérence de l'effort avec la stratégie *Shared*. Le test statistique révèle que cette augmentation est significative ($p = 0.02$).

Comme représenté sur la figure 5.9(c), sous la condition *No Shared*, lorsque le système ne coopère pas, l'effort nécessaire pour diriger la voiture et éviter les obstacles est très important par rapport à la stratégie *Manual* ($p = 0.03$). Cependant, sous la stratégie *Shared*, l'effort fourni par le conducteur est du même ordre que sous la condition *Manual*. Pour cette métrique, le test-T n'a montré aucune différence significative entre les stratégies *Manual* et *Shared*.

Enfin, il ressort clairement de la figure 5.9(d), que sous la condition *Shared* le système a réduit considérablement sa résistance au conducteur comparé à la condition *No Shared* ($p = 0.02$).

La figure 5.10 montre le taux d'inversion de l'angle au volant (SRR) obtenu sous les différentes conditions. Avec les deux stratégies *No Shared* et *Shared* le SRR a augmenté par rapport la condition *Manual*. Par ailleurs, la différence entre ces deux conditions (*No Shared* et *Shared*) n'est pas significative selon le test-T.

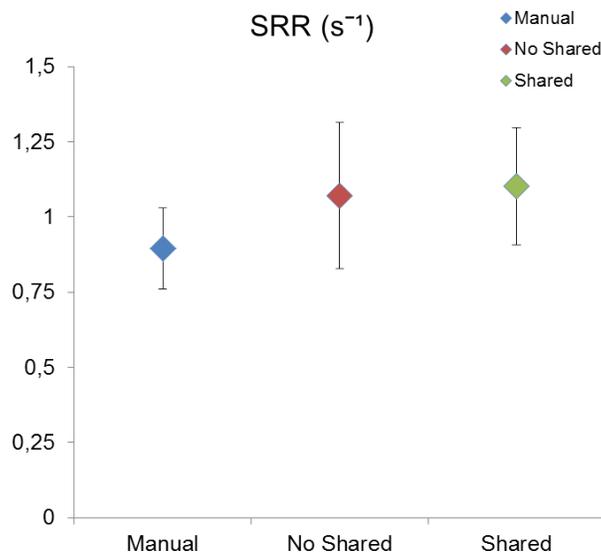


FIGURE 5.10 – Moyennes et écarts types du SRR sous les différentes stratégies

5.4.3.2 Les résultats subjectifs

Les figures 5.11 et 5.12 exposent les résultats subjectifs obtenus lors de l'expérimentation.

Les résultats sur la figure 5.11 montrent que les trois métriques subjectives *Control*, *Comfort* et *Easiness* ont été au plus bas avec la stratégie *No Shared* comparé aux deux autres. Bien que notable, cette différence n'a pas atteint le seuil de la significativité statistique. Toutefois, on retrouve une claire tendance à travers ces trois métriques montrant que le sentiment de contrôle de confort et de facilité des évitements a été pire avec la stratégie *No Shared* tandis

5.4. Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

que la stratégie *Shared* a permis d'avoir un ressenti équivalent ou légèrement inférieur à celui obtenu avec la stratégie *Manual*.

Enfin, l'évaluation subjective de la performance globale de conduite durant le scénario de test avec les différentes conditions est représentée sur la figure 5.12. Il en ressort que la performance de conduite perçue durant le scénario d'évitement d'obstacle ait été la pire avec la stratégie *No Shared*.

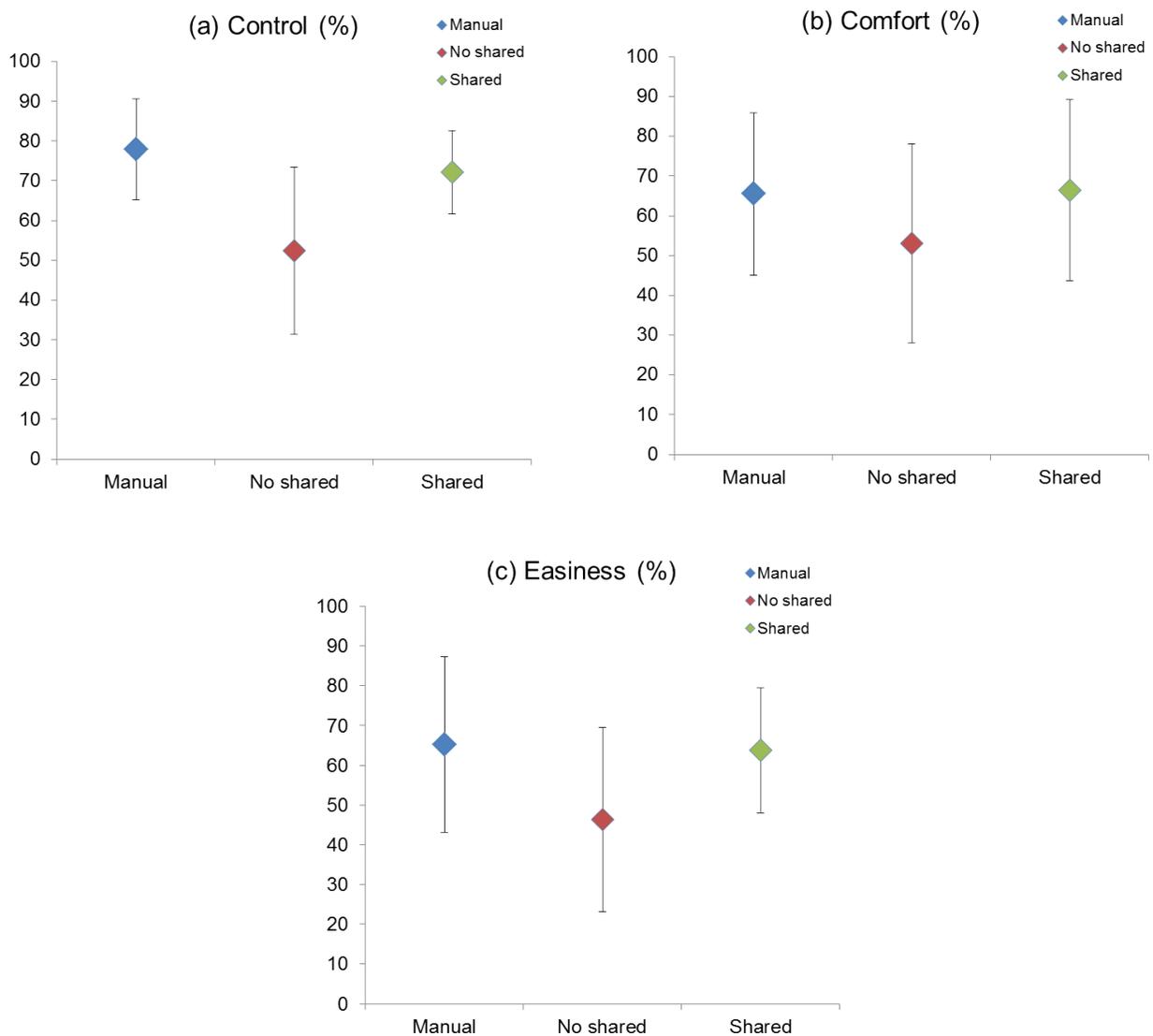


FIGURE 5.11 – Résultats subjectifs rapportant les sentiments de : (a) Contrôle, (b) Confort et (c) Facilité des évitements

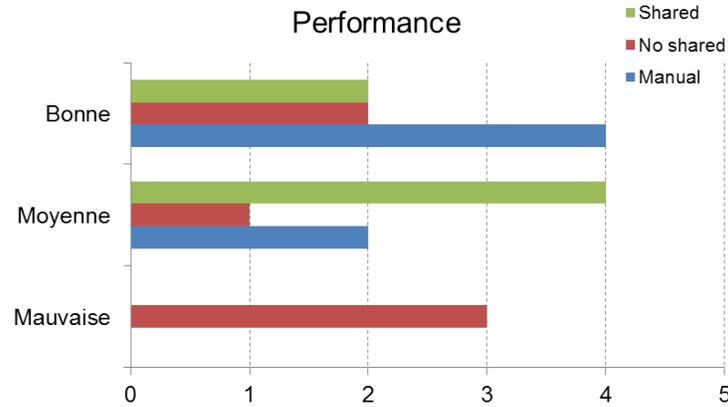


FIGURE 5.12 – Évaluation subjective de la performance de conduite globale avec les différentes stratégies durant le scénario de test

5.4.4 Discussions

Les résultats objectifs ont montré une amélioration de l'interaction entre le conducteur suite à l'introduction de la planification coopérative dans la condition *Shared*.

D'une part, l'effort (StE) mis par le conducteur pour les évitements d'obstacles sous cette condition est nettement moins élevé comparé à la condition *No Shared*. De plus la résistance aux actions du conducteur (StR) que le système a montré durant le scénario de test a également baissé d'une manière significative.

Cela est dû au fait que le système replanifie sa trajectoire de sorte à ce qu'elle suive les actions du conducteur, ce qui résulte en une assistance active lors des manoeuvres d'évitement.

Cela s'est soldé par l'augmentation significative de la cohérence de l'assistance avec les actions du conducteur (TiC et EfC) sous la condition *Shared* par rapport à *No Shared*.

Pour une meilleure compréhension des résultats obtenus nous traçons sur les figures 5.13, 5.14 et 5.15 les couples fournis par le système et le conducteur au niveau du volant et la trajectoire latérale réalisée par le véhicule sous les différentes conditions par le premier sujet de l'expérimentation.

Comme on peut le voir sur la figure 5.14(a) sous la condition *No Shared* le couple du système (Rouge) est constamment opposé à celui du conducteur (Bleu). Cela est expliqué par le fait que le système a pour objectif de garder le véhicule au centre de la voie lorsque le conducteur évite les obstacles disposés sur son chemin. Par conséquent, sous cette condition le conducteur doit fournir un couple de guidage T_d qui excède le couple du système T_c pour pouvoir effectuer les écarts nécessaires aux évitements. Cela résulte en des couples conducteur nettement plus élevés que ceux fournis dans la condition *Manual* montré sur la figure 5.13(a).

5.4. Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

D'autre part, le couple conducteur nécessaire à l'accomplissement de la tâche d'évitement sous la condition *Shared* (figure 5.15(a)) est réduit et est du même ordre que sous la condition *Manual* (fig. 5.13(a)). La figure 5.15(b) oppose la trajectoire réalisée du véhicule (Noir) et la trajectoire planifiée du système (Rouge). Celle-ci est en permanence actualisée pour mieux accommoder les actions du conducteur sur le volant ce qui explique l'augmentation de la cohérence de l'assistance du système avec l'action du conducteur dans cette condition. Toutefois, il y a des phases où la trajectoire planifiée du système ne correspond pas à celle réalisée par le conducteur, particulièrement lorsque l'évitement doit être réalisé rapidement comme on peut le voir sur la fenêtre [37s, 42s] de la figure. Cela est lié au paramétrage de l'algorithme qui privilégie des trajectoires minimisant l'accélération latérale.

L'analyse du taux d'inversion de l'angle au volant (SRR) proportionnel à l'instabilité au niveau du volant a montré que le système sous les deux conditions *No Shared* et *Shared* a provoqué une légère augmentation de l'instabilité du guidage du véhicule en comparaison avec la conduite manuelle.

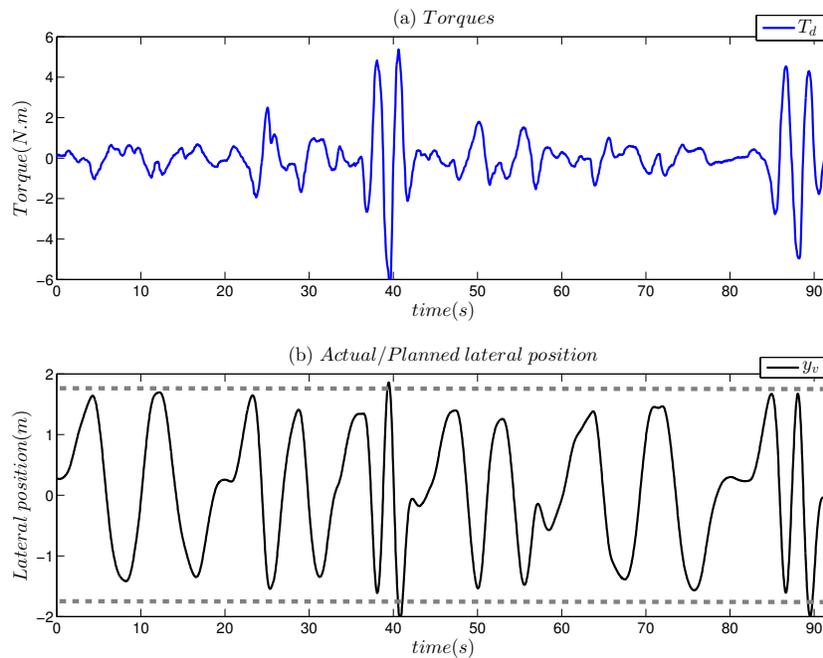


FIGURE 5.13 – (a) Couples de braquage (b) Position latérale réalisée et planifiée du système sous la condition *Manual* pour le sujet 1

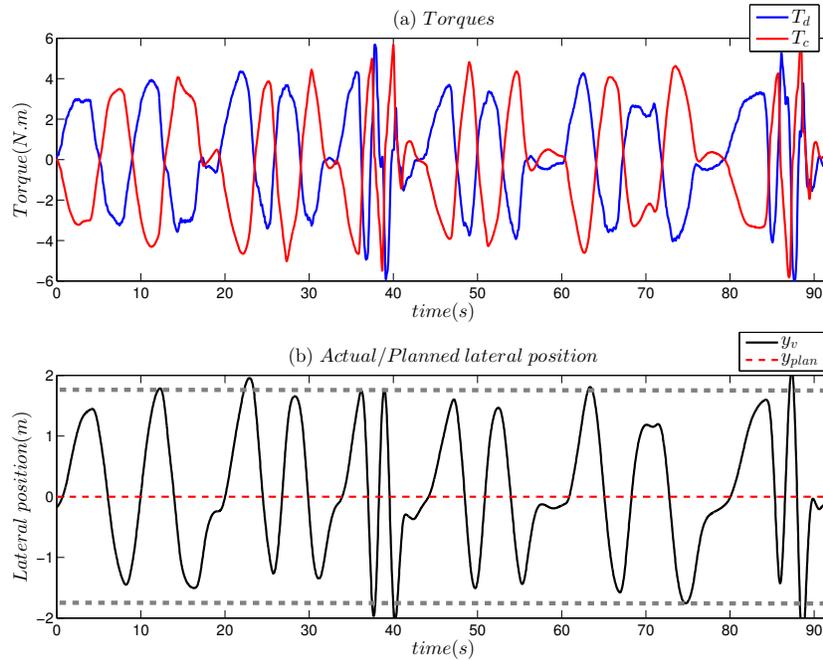


FIGURE 5.14 – (a) Couple de braquage du conducteur et (b) Position latérale réalisée sous la condition *No Shared* pour le sujet 1

Les résultats subjectifs montrent une amélioration claire du ressenti subjectif suite à l'introduction de la planification coopérative dans la condition *Shared*. En effet, la réduction de la résistance au volant et l'assistance active que le conducteur a reçu pendant les manœuvres d'évitement ont contribué à augmenter le sentiment de contrôle du véhicule et le confort du guidage en la présence d'un système d'automatisation dont l'assistance ininterrompue a permis de faciliter les manœuvres d'évitement.

Hormis les résultats obtenus qui attestent de l'amélioration de l'interaction au niveau du volant avec le système doté de la planification de trajectoire coopérative, l'interaction entre le conducteur et le système dans ce cas était uniquement limitée au canal haptique. Comme soulevé par certains participants lors des entretiens post-expérimentaux, il est également intéressant d'inclure dans de futurs développements un retour visuel au niveau de l'IHM ou à l'aide d'un affichage tête haute affichant la trajectoire replanifiée du système afin d'aider les conducteurs à mieux comprendre les actions du système. Nous pensons que cela réduirait d'avantage les conflits au niveau du guidage avec le système.

5.4. Étude 2 (préliminaire) : L'adaptation en temps-réel de la trajectoire (Planification coopérative)

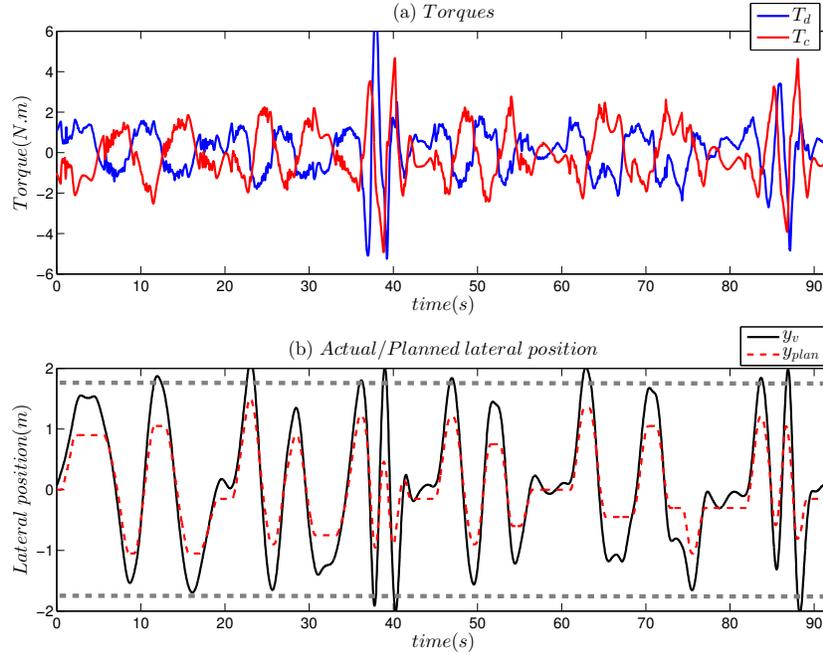


FIGURE 5.15 – (a) Couples de braquage et (b) Position latérale réalisée et planifiée du système sous la condition *Shared* pour le sujet 1

5.4.5 Conclusion

Dans cette étude nous avons pu démontrer l'efficacité de l'approche de planification coopérative dans l'amélioration de l'interaction haptique entre le conducteur et le système pour résoudre des situations de conflit. Dans notre cas le conflit s'est caractérisé par la présence d'obstacles qui constituent une entrave à la trajectoire naturelle du système qui vise à garder le véhicule au centre de la voie. En effet, la mise à jour de la trajectoire du système selon l'action du conducteur a permis un meilleur sentiment de contrôle du véhicule et du confort de guidage tout en garantissant une assistance active est continue qui s'adapte au conducteur pour lui donner plus de liberté sur la trajectoire du véhicule automatisé. Cela s'est reflété sur les métriques objectives qui montrent une baisse significative de l'effort nécessaire au conducteur pour effectuer des manoeuvres d'évitement comparé aux systèmes de maintien de voie classiques dont la trajectoire de références est toujours au centre de la voie. Il a été également montré qu'en mettant en place la coopération au niveau de la trajectoire la cohérence des actions du système avec celles du conducteur augmentaient de manière significative.

Dans une prochaine étape il serait intéressant d'évaluer l'interaction du conducteur avec le système lorsque ce dernier prend en compte les obstacles dans l'étage de planification coopérative de la trajectoire.

Conclusion générale et perspectives

5.5 Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse ont abordé la problématique de coopération et d'interaction entre le conducteur et les systèmes d'automatisation de la conduite se limitant au niveau 2 sur l'échelle de l'OICA. Nous nous sommes penchés sur la question de la structuration de la coopération en prenant en compte :

1. Les interactions à différents niveaux hiérarchiques
2. La gestion des conflits entre conducteur et automate
3. Le transfert d'autorité entre conducteur et automate

Le chapitre 1 a fait l'état de l'art des systèmes avancés d'aide à la conduite et des systèmes d'automatisation de la conduite qu'on connaît aujourd'hui. Les limitations de ces systèmes et le rôle que détient toujours le conducteur dans la tâche de conduite ont permis de mettre en avant le besoin de coopération entre le conducteur et l'automate afin d'éviter des pièges liés à l'automatisation (sur-confiance, perte de la conscience de la situation, dégradation de la performance ...), problèmes qui risquent de compromettre l'aspect sécuritaire que l'automatisation entend apporter initialement.

Dans le but de proposer un cadre qui structure cette coopération, le chapitre 2 a présenté la réflexion menée afin d'aboutir à une architecture fonctionnelle destinée à supporter la coopération entre le conducteur et le système. Les principes de la coopération homme-machine sont exposés dans un cadre général avant d'être détaillés pour le cas de la conduite automobile. En réunissant des éléments issus de la modélisation de la conduite et les principes de la coopération Homme-Machine, nous avons proposé une architecture d'un système coopérant d'automatisation de la conduite. Cette architecture repose sur la notion de coopération multi-niveau qui est importante pour assurer une coopération riche et complète avec l'utilisateur du système.

Dans cette architecture, la coopération s'articule autour de l'interaction, de la détection

et de la résolution des conflits dont la nature change selon la tâche considérée. Compte tenu de la nature hiérarchique de la tâche de conduite, nous avons adapté les principes de coopération aux différents niveaux : stratégique, manœuvre, trajectoire et contrôle. La conduite sur autoroute a été choisie comme cas d'usage pour lequel nous avons développé le concept de coopération multi-niveau.

La schématisation simplifiée de la boucle de contrôle laisse apparaître une hiérarchie entre les blocs fonctionnels de l'architecture : d'une part, des modules de haut niveau dont la fonction relève de la prise de décision où alimente directement un module de décision, et d'autre part une classe de fonctions situées dans une couche exécutive de la tâche de conduite et qui sont régies par les informations de haut niveau.

Le chapitre 3 présente les modules de haut niveau de l'architecture. Trois modules sont abordés : Le module de gestion d'autorité, le module de détection de l'intention et le module de prise de décision sur la manœuvre.

La notion de gestion d'autorité est centrale à la coopération Homme-Machine. Le choix du niveau d'automatisation (mode de fonctionnement) relève de l'attribution des tâches. Le système proposé offre un niveau d'automatisation modulable où le conducteur peut rester aux commandes du véhicule (Niveau 0), déléguer le contrôle longitudinal (Niveau 1) ou déléguer les contrôles longitudinal et latéral (Niveau 2). Les transitions entre les modes sont une problématique à part entière qui retient l'attention de beaucoup de chercheurs. Suite à de nombreuses discussions au sein du consortium, la logique de fonctionnement du système ainsi que les transitions entre les niveaux d'automatisation ont été définies de sorte à assurer la conscience de la situation du conducteur et préserver sa sécurité. L'ensemble des recommandations ont permis de modéliser sous forme de machine à états finis le fonctionnement global du système.

En se basant sur les principes de l'automatisation adaptative et du contrôle partagé nous avons proposé un principe d'affinement de la distribution d'autorité en temps réel en fonction de la situation afin d'adapter le fonctionnement des modules du système au niveau de la manœuvre, de la trajectoire et des contrôleurs en cas de conflit.

Pour coopérer au niveau de la manœuvre, le système a besoin d'inférer l'intention du conducteur. Une méthode de détection de l'intention basée sur la logique floue a été proposée. Celle-ci permet de distinguer trois manœuvres : Le maintien de voie, les changements de voie vers la droite, vers la gauche.

Enfin, l'approche développée pour décider des manœuvres à exécuter par le système est présentée. Inspirée du modèle de la psychologie cognitive de Van Der Molen, celle-ci se base

sur la génération de stratégies candidates en fonction de la situation, la prédiction de la situation pour chaque stratégie et une phase d'évaluation basée sur des fonctions de coût afin d'en déterminer la plus appropriée. L'intérêt de l'approche réside dans l'évaluation et le classement de plusieurs alternatives afin de les confronter à l'intention du conducteur pour assurer une coopération au niveau de la manœuvre.

Dans le chapitre 4 sont présentés deux modules importants du bas niveau qui permettent la coopération au niveau de la trajectoire planifiée localement et au niveau de l'action du système.

Contrairement aux approches de planification classiques, le module de planification locale de trajectoire que nous avons développé intègre une fonctionnalité coopérative qui permet d'adapter la trajectoire du système en temps réel pour accommoder les actions du conducteur dans la mesure où celles-ci respectent la dynamique du véhicule et ne mènent pas vers des collisions. Ce module fait l'objet d'une étude expérimentale dans le chapitre 5.

L'architecture de contrôle latéral proposée permet au système de coopérer avec le conducteur au niveau opérationnel. Cela est possible grâce à la somme pondérée des sorties de deux contrôleurs locaux qui représentent chacun une extrémité du spectre des niveaux de l'autorité haptique (LoHA). La valeur de la pondération est directement liée à l'autorité accordée au conducteur et en fonction de celle-ci, l'action du système peut se montrer complaisante avec le conducteur ou au contraire rejeter son action au niveau du volant. A l'aide de cette approche, une expérimentation étudiant l'impact de l'adaptation en ligne du LoHA sur la performance de conduite ainsi que l'acceptabilité a été menée (Chapitre 5).

Le chapitre 5 présente les tests utilisateur d'évaluation des principes de coopération proposés. Il comprend deux études pour évaluer d'une part la possibilité de faire varier en temps réel l'autorité du conducteur au niveau opérationnel et d'autre part, la possibilité d'adapter la trajectoire en temps réel pour résoudre un conflit au niveau de la direction.

Compte tenu des nombreux avantages qu'offre l'assistance haptique fixe, il était intéressant d'aller plus loin pour étudier l'adaptation en temps réel du niveau de cette assistance en fonction de l'évolution de la situation. L'étude s'est penchée sur la question afin d'évaluer la façon dont l'ALKA, un système qui adapte en ligne son assistance haptique en fonction de l'état du conducteur, affecte les performances de conduite et la sécurité. Elle était également destinée à apporter un éclairage quant à l'acceptation d'un tel système. Les résultats sont cohérents avec les études précédentes qui établissent les avantages d'un retour haptique fixe et continu pour l'assistance au maintien de voie. Par ailleurs, l'étude que nous avons menée a révélé que l'adaptation du niveau d'autorité haptique du système d'assistance permet

d'améliorer la performance lorsque les conducteurs entrent dans une phase de distraction. Les évaluations subjectives ont corroboré ces résultats où une amélioration significative des sentiments perçus de confort, de sécurité, de contrôle et de charge de travail a été notée. Cette étude a fait l'objet d'un article de revue [260] et a permis de montrer l'intérêt et la faisabilité de l'adaptation en temps-réel du degré d'autorité haptique (LoHA).

Dans la deuxième étude nous avons pu démontrer l'efficacité de l'approche de planification coopérative dans l'amélioration de l'interaction haptique entre le conducteur et le système pour résoudre des situations de conflit. Celles-ci étaient caractérisées par la présence d'obstacles sur la trajectoire habituellement utilisée dans les systèmes LKS (véhicule au centre de la voie). L'expérimentation a montré que la mise à jour de la trajectoire du système suivant l'action du conducteur permet de réduire de manière significative l'effort nécessaire pour effectuer des manœuvres d'évitement comparé au cas avec un système de maintien de voie classique dont la trajectoire de référence est toujours le centre de la voie. La coopération au niveau de la trajectoire a également permis d'accroître significativement la cohérence des actions du système avec celles du conducteur, cela, grâce à l'assistance active et continue qui s'adapte au conducteur pour lui donner plus de liberté. Par ailleurs, cette approche a procuré un meilleur sentiment de contrôle du véhicule et un meilleur confort de guidage.

5.6 Perspectives

Les perspectives qu'ouvre le travail entrepris dans le cadre de cette thèse sont nombreuses. En effet, en étudiant la coopération sous ses différents aspects il s'avère que les possibilités sont multiples. D'une part les différents choix faits sur la logique des transitions entre niveaux d'automatisation doivent être étudiés d'une manière plus intensive afin d'en valider la moindre transition. A cet effet, une expérimentation est en cours de préparation et aura pour objet une validation globale du système.

D'autre part, le concept de coopération multi-niveau présenté nécessite encore plus d'attention. En effet, la première étape initiée dans cette thèse était d'intégrer des mécanismes internes à différents blocs (décision sur la manœuvre, planification de trajectoire et contrôleurs) pour en adapter le fonctionnement en fonction d'une variable externe qui caractérise l'autorité du conducteur. Celle-ci est issue du module "*Authority management*". Elle est déterminée selon des règles heuristiques que nous avons posées dans un premier temps. Par conséquent, il demeure intéressant d'explorer de manière plus approfondie ce processus de caractérisation de l'autorité du conducteur afin d'obtenir une information plus rigoureuse. Cette problématique rejoint la recherche sur le diagnostic du conducteur mais doit également tenir compte d'autres facteurs tels que la dynamique du véhicule et l'état du trafic. Il serait également intéressant d'inclure une prédiction de la situation

pour anticiper les situations où le conducteur ne sera plus en mesure de gérer la situation. Cela pourrait évoquer des approches telles que l'étude d'accessibilité (Reachability Analysis).

Par ailleurs, les études que nous avons menées ont démontré l'intérêt de coopérer au niveau de contrôle et au niveau de la trajectoire. Elles ont également fourni des éléments permettant d'extrapoler sur l'intérêt de la coopération au niveau de la manœuvre. En effet, les avantages de l'adaptation de la trajectoire peuvent aussi bien être retrouvés au niveau de la manœuvre dans le cas d'une manœuvre de changement de voie initiée par le conducteur par exemple. Toutefois, démontrer l'intérêt de coopérer à chaque niveau séparément ne suffit pas pour assurer la meilleure coopération. La prochaine étape serait donc d'étudier la combinaison des différentes formes de coopération afin de déterminer la meilleure manière de les agencer.

Pour la coopération dans le haut niveau et particulièrement au niveau tactique, il reste un travail sur les interactions pour définir d'une part le canal d'information le plus efficace (parmi les modalités visuelles, auditives et haptiques) et d'autre part, les informations qui assurent la meilleure compréhension de la situation. Il serait également nécessaire de développer un processus de hiérarchisation de l'information qui permettrait de filtrer les informations communiquées au conducteur.

Il est également intéressant d'étendre ces concepts de coopération à d'autres scénarios à l'exemple des intersections, des rond-points, etc... Pour cela, l'ensemble des fonctionnalités de l'architecture devront être adaptées pour supporter ces nouvelles situations.

En outre, les incertitudes n'ont pas été traitées dans le cadre de cette thèse. Il faudrait donc améliorer les approches utilisées pour traiter des données incertaines issues de la perception et ainsi tenir compte du degré de confiance des mesures. Il est également intéressant de tenir compte de la confiance des mesures dans le processus de gestion de l'autorité afin de donner plus de latitudes au conducteur aux limites de fonctionnement du système.

Bibliographie

- [1] F. Federal Highway Administration, *ROAD SAFETY FUNDAMENTALS*, July 2004. <https://www.ewu.edu/Documents/CBPA/NWTTAP/HighwaySafety/RSF%20Guidebook.pdf>.
- [2] S. Boverie, j.-M. Tissot, S. Feron, and P. Valaix, “Cocovea - l1100,” tech. rep., 2014.
- [3] OICA, “Automated driving - definition for levels of automation,” tech. rep., 2014.
- [4] R. Parasuraman, T. B. Sheridan, and C. D. Wickens, “A model for types and levels of human interaction with automation,” *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A : Systems and Humans*, vol. 30, no. 3, pp. 286–297, 2000.
- [5] J. Rasmussen, “Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, no. 3, pp. 257–266, 1983.
- [6] J. A. Michon, “A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do,” *Human behavior and traffic safety*, pp. 485–520, 1985.
- [7] D. T. McRuer, R. W. Allen, D. H. Weir, and R. H. Klein, “New results in driver steering control models,” *Human factors*, vol. 19, no. 4, pp. 381–397, 1977.
- [8] H. H. Van der Molen and A. M. BÖTTICHER, “A hierarchical risk model for traffic participants,” *Ergonomics*, vol. 31, no. 4, pp. 537–555, 1988.
- [9] OMS, “Rapport de situation sur la sécurité routière 2015,” 2015.
- [10] ONSIR, “La sécurité routière en france, bilan de l’année 2011,” 2011.
- [11] N. Karapetyan, “La sécurité routière en europe, une priorité en matière de santé publique,” 2016. <http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-DocDetails-FR.asp?FileID=22811&lang=FR>.

- [12] Valeo, “L’automobile et la sécurité (rapport),” Septembre 2008.
- [13] N. H. T. S. Administration, “Final regulatory impact analysis : Amendment of fmvss no. 208-passenger car front seat occupant protection,” *Washington DC : US Department of Transportation*, 1984.
- [14] S. Keeler and M. Kimchi, *Advanced high-strength steels application guidelines V5*. WorldAutoSteel, 2015.
- [15] E. Choi *et al.*, “Tire-related factors in the pre-crash phase,” *Report No. DOT HS*, vol. 811, p. 617, 2012.
- [16] S. Velupillai and L. Guvenc, “Tire pressure monitoring [applications of control],” *IEEE Control Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 22–25, 2007.
- [17] J. Bullough and N. Skinner, “Benefits of intelligent headlamp technologies to pedestrian safety at roundabouts,” tech. rep., 2012.
- [18] J. D. Bullough, H. Yan, and J. Van Derlofske, “Effects of sweeping, color and luminance distribution on response to automotive stop lamps,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2002.
- [19] Citroën, *Projecteurs Automatiques*, 2016 (accessed February 11, 2016). <http://www.citroen.ch/fr/univers-citroen/technologies/projecteurs-automatiques.html>.
- [20] Citroën, *Projecteurs Directionnels Xénon Bifonction*, 2016 (accessed February 12, 2016). <http://www.citroen.ch/fr/univers-citroen/technologies/projecteurs-directionnels-xenon.html>.
- [21] J. Song, H. Kim, and K. Boo, “A study on an anti-lock braking system controller and rear-wheel controller to enhance vehicle lateral stability,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering*, vol. 221, no. 7, pp. 777–787, 2007.
- [22] A. T. Van Zanten, “Evolution of electronic control systems for improving the vehicle dynamic behavior,” in *Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, vol. 2, p. 9, 2002.
- [23] A. Lie, C. Tingvall, M. Krafft, and A. Kullgren, “The effectiveness of electronic stability control (esc) in reducing real life crashes and injuries,” *Traffic injury prevention*, vol. 7, no. 1, pp. 38–43, 2006.

- [24] M. Aga and A. Okada, "Analysis of vehicle stability control (vsc)'s effectiveness from accident data," in *Proceedings of the 18 th ESV Conference, paper*, no. 541, 2003.
- [25] R. Sferco, Y. Page, J.-Y. Le Coz, and P. Fay, "Potential effectiveness of electronic stability programs (esp)—what european field studies tell us," in *Proceeding of 17 th ESV Conference. Amsterdam, The Netherlands*, 2001.
- [26] J. Lu, D. Messih, and A. Salib, "Roll rate based stability control—the roll stability control system," in *Proceedings of the 20th Enhanced Safety of Vehicles Conference*, no. 07-0136, 2007.
- [27] U. Lundgren, J. Peters, M. Smulders, S. Johnston, and M. Lörtzer, "Independent research by dutch research institute tno shows that satellite navigation systems have a positive influence on road safety," tech. rep., 2007.
- [28] K. Bengler, K. Dietmayer, B. Farber, M. Maurer, C. Stiller, and H. Winner, "Three decades of driver assistance systems : Review and future perspectives," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 6–22, 2014.
- [29] W. D. Jones, "Safer driving in the dead of night," *IEEE Spectrum*, vol. 43, no. 3, pp. 20–21, 2006.
- [30] J. W. Lee, "A machine vision system for lane-departure detection," *Computer vision and image understanding*, vol. 86, no. 1, pp. 52–78, 2002.
- [31] P.-Y. Hsiao, C.-W. Yeh, S.-S. Huang, and L.-C. Fu, "A portable vision-based real-time lane departure warning system : day and night," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 2089–2094, 2009.
- [32] M. Rimini-Doering, T. Altmueller, U. Ladstaetter, and M. Rossmeyer, "Effects of lane departure warning on drowsy drivers' performance and state in a simulator," in *Proceedings of the third international driving symposium on human factors in driver assessment, training, and vehicle design*, pp. 88–95, 2005.
- [33] Citroen, *Blind Spot Monitoring System*, 2017 (accessed December 20, 2017). <http://www.citroen.co.uk/about-citroen/technology/blind-spot-monitoring-system>.
- [34] J. Lee, K. Yi, H. Yoo, H. Chong, and B. Ko, "Risk management algorithm for rear-side collision avoidance using a combined steering torque overlay and differential braking," *Vehicle system dynamics*, vol. 53, no. 6, pp. 812–832, 2015.

- [35] J. D. Alonso, E. R. Vidal, A. Rotter, and M. Muhlenberg, "Lane-change decision aid system based on motion-driven vehicle tracking," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 2736–2746, 2008.
- [36] R. Schubert, "Evaluating the utility of driving : Toward automated decision making under uncertainty," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 354–364, 2012.
- [37] S. Habenicht, H. Winner, S. Bone, F. Sasse, and P. Korzenietz, "A maneuver-based lane change assistance system," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pp. 375–380, IEEE, 2011.
- [38] M. Roelofsen, J. Bie, L. Jin, and B. van Arem, "Assessment of safety levels and an innovative design for the lane change assistant," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010 IEEE*, pp. 83–88, IEEE, 2010.
- [39] I. Standard, "17387 :2008,"intelligent transport systems – lane change decision aid systems (lcdas) – performance requirements and test procedures",” *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, 2008.
- [40] R. Isermann, "Mechatronic systems—innovative products with embedded control," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 1, pp. 14–29, 2008.
- [41] F. Bu and C.-Y. Chan, "Adaptive and cooperative cruise control," in *Handbook of Intelligent Vehicles*, pp. 191–207, Springer, 2012.
- [42] A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof, and D. Helbing, "Adaptive cruise control design for active congestion avoidance," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 16, no. 6, pp. 668–683, 2008.
- [43] K. Lee and H. Peng, "Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms," *Vehicle System Dynamics*, vol. 43, no. 10, pp. 735–751, 2005.
- [44] J. Navarro, F. Mars, and M. S. Young, "Lateral control assistance in car driving : classification, review and future prospects," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 207–220, 2011.
- [45] M. S. Netto, S. Chaib, and S. Mammar, "Lateral adaptive control for vehicle lane keeping," in *American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004*, vol. 3, pp. 2693–2698, IEEE, 2004.

- [46] N. Kämpchen, M. Aeberhard, M. Ardel, and S. Rauch, “Technologies for highly automated driving on highways,” *ATZ worldwide*, vol. 114, no. 6, pp. 34–38, 2012.
- [47] P. Jeevan, F. Harchut, B. Mueller-Bessler, and B. Huhnke, “Realizing autonomous valet parking with automotive grade sensors,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3824–3829, IEEE, 2010.
- [48] M. Wada, K. S. Yoon, and H. Hashimoto, “Development of advanced parking assistance system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 4–17, 2003.
- [49] M. Blanco, J. Atwood, H. M. Vasquez, T. E. Trimble, V. L. Fitchett, J. Radlbeck, G. M. Fitch, S. M. Russell, C. A. Green, B. Cullinane, *et al.*, “Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts,” tech. rep., 2015.
- [50] T. M. Gasser and D. Westhoff, “Bast-study : Definitions of automation and legal issues in germany,” in *Proceedings of the 2012 Road Vehicle Automation Workshop*, 2012.
- [51] SAE, “Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems,” *SAE Standard J3016*, pp. 01–16, 2014.
- [52] P. J. Antsaklis, K. M. Passino, and S. Wang, “An introduction to autonomous control systems,” *IEEE Control Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 5–13, 1991.
- [53] T. Kanade, C. Thorpe, and W. Whittaker, “Autonomous land vehicle project at cmu,” in *Proceedings of the 1986 ACM fourteenth annual conference on Computer science*, pp. 71–80, ACM, 1986.
- [54] NAVLAB, *The Carnegie Mellon University Navigation Laboratory*, 2017 (accessed February 20, 2017). <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/www/>.
- [55] M. Williams, “Prometheus-the european research programme for optimising the road transport system in europe,” in *Driver Information, IEE Colloquium on*, pp. 1–1, IET, 1988.
- [56] E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek, and J. Schiehlen, “The seeing passenger car’vamor-p’,” in *Intelligent Vehicles’ 94 Symposium, Proceedings of the*, pp. 68–73, IEEE, 1994.
- [57] B. Ulmer, “Vita ii-active collision avoidance in real traffic,” in *Intelligent Vehicles’ 94 Symposium, Proceedings of the*, pp. 1–6, IEEE, 1994.

- [58] R. Behringer and R. Maurer, “Results on visual road recognition for road vehicle guidance,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE*, pp. 415–420, IEEE, 1996.
- [59] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann, *et al.*, “Stanley : The robot that won the darpa grand challenge,” *Journal of field Robotics*, vol. 23, no. 9, pp. 661–692, 2006.
- [60] C. Urmson, J. Anhalt, D. Bagnell, C. Baker, R. Bittner, M. Clark, J. Dolan, D. Duggins, T. Galatali, C. Geyer, *et al.*, “Autonomous driving in urban environments : Boss and the urban challenge,” *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 8, pp. 425–466, 2008.
- [61] T. Litman, “Autonomous vehicle implementation predictions,” *Victoria Transport Policy Institute*, vol. 28, 2014.
- [62] O. Carsten, N. Merat, W. Janssen, E. Johansson, M. Fowkes, and K. Brookhuis, “Human machine interaction and the safety of traffic in europe final report,” *Portal, Leeds, UK : Transp. Res. Innov.*, 2005.
- [63] G. Markkula, E. Johansson, R. Montanari, E. Chin, F. Tango, E. Nodari, L. Andreone, R. Brouwer, W. Janssen, B. Peters, A. Amditis, Pagle, *et al.*, “deliverable d4.1.6 - aide final activity report,” tech. rep., 2008.
- [64] M. Schulze, T. Mäkinen, J. Irion, M. Flament, and T. Kessel, “Ip_d15 : Final report,” *PREVENT-EUFP6 Project Deliverable*, 2008.
- [65] G. Alessandrelli, A. Admitis, S. Metzner, E. Johansson, and F. Fahrenkrog, “Interactive - deliverable d1.9 | final report,” tech. rep., 2014.
- [66] L. Gomes, “When will google’s self-driving car really be ready ? it depends on where you live and what you mean by" ready"[news],” *IEEE Spectrum*, vol. 53, no. 5, pp. 13–14, 2016.
- [67] R. Hoeger, A. Amditis, M. Kunert, A. Hoess, F. Flemisch, H.-P. Krueger, A. Bartels, A. Beutner, and K. Pagle, “Highly automated vehicles for intelligent transport : Haveit approach,” in *ITS World Congress, NY, USA*, 2008.
- [68] R. Hoeger, H. Zeng, A. Hoess, T. Kranz, S. Boverie, M. Strauss, E. Jakobsson, A. Beutner, A. Bartels, T. To, *et al.*, “The future of driving - haveit (final report, deliverable d61. 1),” *Highly automated vehicles for intelligent transport (HAVEit). 7th Framework programme*, 2011.

- [69] J.-M. Hoc, P. Chevrel, M. Deroo, F. Mars, J.-F. Petiot, T. Bellet, J.-C. Paris, M. Netto, G. Saint-Pierre, L. Goyat, Y. Nouvelière, *et al.*, “PARTAGE - contrôle partagé entre conducteur et assistance à la conduite automobile pour une trajectoire sécurisée (rapport de synthèse),” *Iffstar, Publications scientifiques*, 2012.
- [70] L. Saleh, *Contrôle latéral partagé d’un véhicule automobile*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012.
- [71] J. Navarro, *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire*. PhD thesis, Université de Nantes, 2008.
- [72] C. Sentouh, J.-C. Popieul, S. Debernard, and S. Boverie, “Human-machine interaction in automated vehicle : The abv project,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 6344–6349, 2014.
- [73] B. Soualmi, *Coopération Homme Machine pour la conduite automatisée : une approche par partage haptique du contrôle*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2014.
- [74] E. Bauer, F. Lotz, M. Pfromm, M. Schreier, B. Abendroth, S. Cieler, A. Eckert, A. Hohm, S. Lüke, P. Rieth, *et al.*, “Proreta 3 : An integrated approach to collision avoidance and vehicle automation,” *at-Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs-und Informationstechnik*, vol. 60, no. 12, pp. 755–765, 2012.
- [75] P. C. Schutte, “How to make the most of your human : design considerations for human-machine interactions,” *Cognition, Technology & Work*, vol. 19, pp. 233–249, Sep 2017.
- [76] L. Bainbridge, “Ironies of automation,” *Automatica*, vol. 19, no. 6, pp. 775–779, 1983.
- [77] M. Saffarian, J. C. de Winter, and R. Happee, “Automated driving : human-factors issues and design solutions,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 56, pp. 2296–2300, Sage Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2012.
- [78] D. B. Kaber and M. R. Endsley, “The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task,” *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 5, no. 2, pp. 113–153, 2004.

- [79] T. Inagaki, Y. Takae, and N. Moray, “Decision support information for takeoff safety in the human-centered automation : An experimental investigation of time-fragile characteristics,” in *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 1101–1106, IEEE, 1999.
- [80] G. F. Smith, “Representational effects on the solving of an unstructured decision problem,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1083–1090, 1989.
- [81] M. T. Dzindolet, S. A. Peterson, R. A. Pomranky, L. G. Pierce, and H. P. Beck, “The role of trust in automation reliance,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 58, no. 6, pp. 697–718, 2003.
- [82] J. D. Lee and K. A. See, “Trust in automation : Designing for appropriate reliance,” *Human factors*, vol. 46, no. 1, pp. 50–80, 2004.
- [83] R. Parasuraman and V. Riley, “Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse,” *Human factors*, vol. 39, no. 2, pp. 230–253, 1997.
- [84] M. S. Young and N. A. Stanton, “What’s skill got to do with it? vehicle automation and driver mental workload,” *Ergonomics*, vol. 50, no. 8, pp. 1324–1339, 2007.
- [85] J.-M. Hoc and M.-P. Lemoine, “Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in air traffic control,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 8, no. 1, pp. 1–32, 1998.
- [86] F. O. Flemisch, K. Bengler, H. Bubb, H. Winner, and R. Bruder, “Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles : H-mode and conduct-by-wire,” *Ergonomics*, vol. 57, no. 3, pp. 343–360, 2014.
- [87] M.-P. Pacaux-Lemoine, P. Simon, and J.-C. Popieul, “Human-machine cooperation principles to support driving automation systems design,” *FAST zero*, 2015.
- [88] B. Brown and E. Laurier, “The trouble with autopilots : Assisted and autonomous driving on the social road,” in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 416–429, ACM, 2017.
- [89] D. Yadron and D. Tynan, “Tesla driver dies in first fatal crash while using autopilot mode,” *The Guardian*, vol. 1, 2016.

- [90] P. Millot and G. A. Boy, “Human-machine cooperation : a solution for life-critical systems?,” *Work*, vol. 41, no. Supplement 1, pp. 4552–4559, 2012.
- [91] G. Johannsen, “Man-machine systems-introduction and background,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 15, no. 6, pp. xiii–xvii, 1982.
- [92] B. P. Goettl, “Attention, workload, and automation,” *Automation and systems issues in air traffic control*, no. 73, p. 293, 1991.
- [93] P. Millot and R. Mandiau, “Man-machine cooperative organizations : Formal and,” *Expertise and technology : cognition & human-computer cooperation*, p. 213, 2013.
- [94] S. Debernard and J. Hoc, “Designing dynamic human-machine task allocation in air traffic control : Lessons drawn from a multidisciplinary collaboration,” *Usability evaluation and Interface design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality*, vol. 1, pp. 1440–1444, 2001.
- [95] P. Millot, S. Debernard, and F. Vanderhaegen, “Authority and cooperation between humans and machines,” *Handbook for Human-Machine Interaction. Ashgate Publishing Ltd, Wey Court East, Union Road, Farnham, Surrey, GU9 7PT, England*, 2011.
- [96] G. A. Boy and G. Grote, “The authority issue in organizational automation,” *The Handbook of Human-machine-interaction. Ashgate, London*, pp. 131–151, 2011.
- [97] T. B. Sheridan and W. L. Verplank, “Human and computer control of undersea teleoperators,” tech. rep., MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE MAN-MACHINE SYSTEMS LAB, 1978.
- [98] A. Baddeley, S. Della Sala, T. Robbins, and A. Baddeley, “Working memory and executive control,” *Philosophical Transactions : Biological Sciences*, pp. 1397–1404, 1996.
- [99] C. E. Billings, “Human-centered aviation automation : Principles and guidelines,” 1996.
- [100] C. E. Billings and D. D. Woods, “Concerns about adaptive automation in aviation systems,” *Human performance in automated systems : Current research and trends*, pp. 264–269, 1994.
- [101] T. Inagaki, “Smart collaboration between humans and machines based on mutual understanding,” *Annual Reviews in Control*, vol. 32, no. 2, pp. 253–261, 2008.
- [102] M. W. Scerbo, “Theoretical perspectives on adaptive automation.,” 1996.

- [103] R. Parasuraman, T. Bahri, J. E. Deaton, J. G. Morrison, and M. Barnes, "Theory and design of adaptive automation in aviation systems," tech. rep., CATHOLIC UNIV OF AMERICA WASHINGTON DC COGNITIVE SCIENCE LAB, 1992.
- [104] T. Inagaki, "Adaptive automation : Sharing and trading of control," *Handbook of cognitive task design*, vol. 8, pp. 147–169, 2003.
- [105] R. Parasuraman, M. Mouloua, and R. Molloy, "Effects of adaptive task allocation on monitoring of automated systems," *Human factors*, vol. 38, no. 4, pp. 665–679, 1996.
- [106] G. F. Wilson and C. A. Russell, "Psychophysiologicaly determined adaptive aiding in a simulated ucav task," *Human performance, situation awareness, and automation : Current research and trends*, pp. 200–204, 2004.
- [107] J. Piaget, *Études sociologiques*, vol. 32. Librairie Droz, 1965.
- [108] J.-M. Hoc, "Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in dynamic situations," *International journal of human-computer studies*, vol. 54, no. 4, pp. 509–540, 2001.
- [109] P. Millot and M. Lemoine, "An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation," in *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 1044–1049, IEEE, 1998.
- [110] K. Schmidt, J. Rasmussen, B. Brehmer, and J. Leplat, "Cooperative work : A conceptual framework," *Distributed decision-making : Cognitive models for cooperative work*, pp. 75–110, 1991.
- [111] M. Pacaux-Lemoine and S. Debernard, "Common work space for human–machine cooperation in air traffic control," *Control Engineering Practice*, vol. 10, no. 5, pp. 571–576, 2002.
- [112] C. Castelfranchi, "Modelling social action for ai agents," *Artificial Intelligence*, vol. 103, no. 1-2, pp. 157–182, 1998.
- [113] G. Klien, D. D. Woods, J. M. Bradshaw, R. R. Hoffman, and P. J. Feltovich, "Ten challenges for making automation a " team player" in joint human-agent activity," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 91–95, 2004.
- [114] J.-M. Hoc and S. Debernard, "Respective demands of task and function allocation on human-machine co-operation design : a psychological approach," *Connection science*, vol. 14, no. 4, pp. 283–295, 2002.

- [115] F. Vanderhaegen, “Multilevel organization design : the case of the air traffic control,” *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 3, pp. 391–399, 1997.
- [116] F. Vanderhaegen, I. Crevits, S. Debernard, and P. Millot, “Human-machine cooperation : Toward an activity regulation assistance for different air traffic control levels,” *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 6, no. 1, pp. 65–104, 1994.
- [117] J. Krüger, T. K. Lien, and A. Verl, “Cooperation of human and machines in assembly lines,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 628–646, 2009.
- [118] S. Zieba, P. Polet, and F. Vanderhaegen, “Using adjustable autonomy and human-machine cooperation to make a human-machine system resilient-application to a ground robotic system,” *Information Sciences*, vol. 181, no. 3, pp. 379–397, 2011.
- [119] M.-P. Pacaux-Lemoine and P. Millot, “Adaptive level of automation for risk management,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 48–53, 2016.
- [120] F. O. Flemisch, C. A. Adams, S. R. Conway, K. H. Goodrich, M. T. Palmer, and P. C. Schutte, “The h-metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction,” 2003.
- [121] F. Flemisch, M. Heesen, T. Hesse, J. Kelsch, A. Schieben, and J. Beller, “Towards a dynamic balance between humans and automation : authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations,” *Cognition, Technology & Work*, vol. 14, no. 1, pp. 3–18, 2012.
- [122] D. A. Abbink, M. Mulder, and E. R. Boer, “Haptic shared control : smoothly shifting control authority?,” *Cognition, Technology & Work*, vol. 14, no. 1, pp. 19–28, 2012.
- [123] F. Mars, M. Deroo, and J.-M. Hoc, “Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 7, no. 3, pp. 324–333, 2014.
- [124] E. Altendorf, G. Weßel, M. Baltzer, Y. Canpolat, and F. Flemisch, “Joint decision making and cooperative driver-vehicle interaction during critical driving situations,” *i-com*, vol. 15, no. 3, pp. 265–281, 2016.
- [125] O. Carsten, “From driver models to modelling the driver : what do we really need to know about the driver?,” in *Modelling driver behaviour in automotive environments*, pp. 105–120, Springer, 2007.
- [126] A. J. McKnight and B. B. Adams, “Driver education task analysis. volume ii : Task analysis methods. final report.,” 1970.

-
- [127] E. Donges, “A two-level model of driver steering behavior,” *Human Factors*, vol. 20, no. 6, pp. 691–707, 1978.
- [128] C. Sentouh, P. Chevrel, F. Mars, and F. Claveau, “A sensorimotor driver model for steering control,” in *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, pp. 2462–2467, IEEE, 2009.
- [129] A. Ameyoe, *Estimation de la distraction fondée sur un modèle dynamique de conducteur : principes et algorithmes*. PhD thesis, Nantes, Ecole des Mines, 2016.
- [130] D. Taylor, “Drivers’ galvanic skin response and the risk of accident,” *Ergonomics*, vol. 7, no. 4, pp. 439–451, 1964.
- [131] R. Näätänen and H. Summala, “A model for the role of motivational factors in drivers’ decision-making*,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 6, no. 3, pp. 243–261, 1974.
- [132] G. J. Wilde, “The theory of risk homeostasis : implications for safety and health,” *Risk analysis*, vol. 2, no. 4, pp. 209–225, 1982.
- [133] T. A. Ranney, “Models of driving behavior : a review of their evolution,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 26, no. 6, pp. 733–750, 1994.
- [134] T. Rothengatter, “Risk and the absence of pleasure : a motivational approach to modelling road user behaviour,” *Ergonomics*, vol. 31, no. 4, pp. 599–607, 1988.
- [135] T. Bellet, B. Bailly, P. Mayenobe, and O. Georgeon, “Cognitive modelling and computational simulation of drivers mental activities,” *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, pp. 315–343, 2007.
- [136] F. Flemisch, A. Schieben, J. Kelsch, and C. Löper, “Automation spectrum, inner/outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation,” *Human Factors for assistance and automation*, 2008.
- [137] O. Carsten, F. C. Lai, Y. Barnard, A. H. Jamson, and N. Merat, “Control task substitution in semiautomated driving : Does it matter what aspects are automated?,” *Human factors*, vol. 54, no. 5, pp. 747–761, 2012.
- [138] N. Merat, A. H. Jamson, F. C. Lai, M. Daly, and O. M. Carsten, “Transition to manual : Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle,” *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, vol. 27, pp. 274–282, 2014.
-

- [139] C. Gold, M. Körber, D. Lechner, and K. Bengler, “Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations : the role of traffic density,” *Human factors*, vol. 58, no. 4, pp. 642–652, 2016.
- [140] J.-M. Hoc, F. Mars, I. Milleville-Pennel, É. Jolly, M. Netto, and J.-M. Blosseville, “Human-machine cooperation in car driving for lateral safety : delegation and mutual control,” *Le travail humain*, vol. 69, no. 2, pp. 153–182, 2006.
- [141] J. Navarro, M. François, and F. Mars, “Obstacle avoidance under automated steering : impact on driving and gaze behaviours,” *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, vol. 43, pp. 315–324, 2016.
- [142] M. Baltzer, F. Flemisch, E. Altendorf, and S. Meier, “Mediating the interaction between human and automation during the arbitration processes in cooperative guidance and control of highly automated vehicles,” in *Proceedings of the 5th international conference on applied human factors and ergonomics AHFE*, 2014.
- [143] N. Wu, F. Chu, S. Mammar, and M. Zhou, “Petri net modeling of the cooperation behavior of a driver and a copilot in an advanced driving assistance system,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 977–989, 2011.
- [144] M.-P. Pacaux-Lemoine and F. Flemisch, “Layers of shared and cooperative control, assistance and automation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 159–164, 2016.
- [145] F. Holzmann, *Adaptive cooperation between driver and assistant system : improving road safety*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [146] J.-M. Hoc and C. Chauvin, “Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines,” *Manuscript submitted for publication*, 2011.
- [147] M. Mulder, D. A. Abbink, and E. R. Boer, “Sharing control with haptics : Seamless driver support from manual to automatic control,” *Human factors*, vol. 54, no. 5, pp. 786–798, 2012.
- [148] P. G. Griffiths and R. B. Gillespie, “Sharing control between humans and automation using haptic interface : primary and secondary task performance benefits,” *Human factors*, vol. 47, no. 3, pp. 574–590, 2005.
- [149] M. Itoh, F. Flemisch, and D. Abbink, “A hierarchical framework to analyze shared control conflicts between human and machine,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 96–101, 2016.

- [150] K. K. Tsoi, M. Mulder, and D. A. Abbink, “Balancing safety and support : Changing lanes with a haptic lane-keeping support system,” in *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1236–1243, IEEE, 2010.
- [151] M. A. Benloucif, J.-C. Popieul, and C. Sentouh, “Architecture for multi-level cooperation and dynamic authority management in an automated driving system-a case study on lane change cooperation,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 615–620, 2016.
- [152] M. Benloucif, J.-C. Popieul, and C. Sentouh, “Multi-level cooperation between the driver and an automated driving system during lane change maneuver,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2016 IEEE*, pp. 1224–1229, IEEE, 2016.
- [153] Y. Chen, M. G. Bell, and K. Bogenberger, “Reliable pretrip multipath planning and dynamic adaptation for a centralized road navigation system,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 14–20, 2007.
- [154] S. Sivaraman and M. M. Trivedi, “Dynamic probabilistic drivability maps for lane change and merge driver assistance,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 2063–2073, 2014.
- [155] M. Aeberhard, S. Rauch, M. Bahram, G. Tanzmeister, J. Thomas, Y. Pilat, F. Homm, W. Huber, and N. Kaempchen, “lessons learned from automated driving on germany’s highways,” *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 42–57, 2015.
- [156] S. Glaser, B. Vanholme, S. Mammar, D. Gruyer, and L. Nouveliere, “Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 589–606, 2010.
- [157] M. A. Benloucif, A.-T. Nguyen, C. Sentouh, and J.-C. Popieul, “A new scheme for haptic shared lateral control in highway driving using trajectory planning,” in *IFAC World Congress*, Elsevier, 2017.
- [158] T. Brandt, T. Sattel, and M. Bohm, “Combining haptic human-machine interaction with predictive path planning for lane-keeping and collision avoidance systems,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*, pp. 582–587, IEEE, 2007.
- [159] L. Saleh, P. Chevrel, F. Claveau, J.-F. Lafay, and F. Mars, “Shared steering control between a driver and an automation : Stability in the presence of driver behavior

- uncertainty,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 974–983, 2013.
- [160] B. Soualmi, C. Sentouh, J. Popieul, and S. Debernard, “Automation-driver cooperative driving in presence of undetected obstacles,” *Control engineering practice*, vol. 24, pp. 106–119, 2014.
- [161] A.-T. Nguyen, C. Sentouh, and J.-C. Popieul, “Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints : Design and experiments,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3819–3830, 2017.
- [162] D. Abbink and M. Mulder, “Exploring the dimensions of haptic feedback support in manual control,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 9, no. 1, p. 011006, 2009.
- [163] C. Sentouh, B. Soualmi, J.-C. Popieul, and S. Debernard, “Cooperative steering assist control system,” in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 941–946, IEEE, 2013.
- [164] J. Miura, M. Itoh, and Y. Shirai, “Toward vision-based intelligent navigator : its concept and prototype,” *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 3, no. 2, pp. 136–146, 2002.
- [165] D. Delorme and B. Song, “Human driver model for smartahs,” *California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*, 2001.
- [166] Y. Dong, Z. Hu, Y. Zhou, K. Uchimura, and N. Murayama, “A robust and efficient face tracker for driver inattention monitoring system,” in *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2011 9th World Congress on*, pp. 1212–1217, IEEE, 2011.
- [167] S. Boverie and A. Giralt, “Driver vigilance diagnostic based on eyelid movement observation,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 12831–12836, 2008.
- [168] C. Guo, C. Sentouh, J.-C. Popieul, B. Soualmi, and J.-B. Haué, “Shared control framework applied for vehicle longitudinal control in highway merging scenarios,” in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 3098–3103, IEEE, 2015.
- [169] B. Sen, J. D. Smith, and W. G. Najm, “Analysis of lane change crashes,” tech. rep., 2003.

- [170] C. Sentouh, A. Benloucif, J. Floris, P. Simon, S. Debernard, M.-P. Pacaux, and J.-C. Popieul, “L3100 : Spécifications du partage de la commande et des besoins informationnels,” *Livrable WP3 : Partage de la commande*, 2016.
- [171] C. Sentouh, A. Benloucif, P. Floris, J. and Simon, and P. J-C., “L3200 : Algorithmes de modulation du niveau d’automatisation,” *Livrable WP3 : Partage de la commande*, 2017.
- [172] Y. Dong, Z. Hu, K. Uchimura, and N. Murayama, “Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles : A review,” *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 12, no. 2, pp. 596–614, 2011.
- [173] J. Pohl, W. Birk, and L. Westervall, “A driver-distraction-based lane-keeping assistance system,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 221, no. 4, pp. 541–552, 2007.
- [174] S. Lefèvre, D. Vasquez, and C. Laugier, “A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles,” *Robomech Journal*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2014.
- [175] A. Doshi and M. M. Trivedi, “Tactical driver behavior prediction and intent inference : A review,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, pp. 1892–1897, IEEE, 2011.
- [176] P. Kumar, M. Perrollaz, S. Lefevre, and C. Laugier, “Learning-based approach for online lane change intention prediction,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pp. 797–802, IEEE, 2013.
- [177] N. Kuge, T. Yamamura, O. Shimoyama, and A. Liu, “A driver behavior recognition method based on a driver model framework,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2000.
- [178] A. Pentland and A. Liu, “Modeling and prediction of human behavior,” *Neural computation*, vol. 11, no. 1, pp. 229–242, 1999.
- [179] N. Oliver and A. P. Pentland, “Graphical models for driver behavior recognition in a smartcar,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pp. 7–12, IEEE, 2000.
- [180] D. Kasper, G. Weidl, T. Dang, G. Breuel, A. Tamke, A. Wedel, and W. Rosenstiel, “Object-oriented bayesian networks for detection of lane change maneuvers,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 19–31, 2012.

- [181] Ü. Dogan, J. Edelbrunner, and I. Iossifidis, “Autonomous driving : A comparison of machine learning techniques by means of the prediction of lane change behavior,” in *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1837–1843, IEEE, 2011.
- [182] J. Krumm, “A markov model for driver turn prediction,” tech. rep., SAE Technical Paper, 2008.
- [183] J. Nilsson, J. Fredriksson, and E. Coelingh, “Rule-based highway maneuver intention recognition,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, pp. 950–955, IEEE, 2015.
- [184] S. Y. Cheng and M. M. Trivedi, “Turn-intent analysis using body pose for intelligent driver assistance,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 28–37, 2006.
- [185] J. Hillenbrand, K. Kroschel, and V. Schmid, “Situation assessment algorithm for a collision prevention assistant,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings. IEEE*, pp. 459–465, IEEE, 2005.
- [186] J. C. McCall and M. M. Trivedi, “Driver behavior and situation aware brake assistance for intelligent vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 2, pp. 374–387, 2007.
- [187] K. Hayashi, Y. Kojima, K. Abe, and K. Oguri, “Prediction of stopping maneuver considering driver’s state,” in *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC’06. IEEE*, pp. 1191–1196, IEEE, 2006.
- [188] S. Mammar, S. Glaser, and M. Netto, “Time to line crossing for lane departure avoidance : A theoretical study and an experimental setting,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 226–241, 2006.
- [189] D. D. Salvucci, “Inferring driver intent : A case study in lane-change detection,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 48, pp. 2228–2231, SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2004.
- [190] D. D. Salvucci, H. M. Mandalia, N. Kuge, and T. Yamamura, “Lane-change detection using a computational driver model,” *Human factors*, vol. 49, no. 3, pp. 532–542, 2007.
- [191] A. Houenou, P. Bonnifait, V. Cherfaoui, and W. Yao, “Vehicle trajectory prediction based on motion model and maneuver recognition,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4363–4369, IEEE, 2013.

- [192] M. G. Ortiz, F. Kummert, and J. Schmüdderich, "Prediction of driver behavior on a limited sensory setting," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, pp. 638–643, IEEE, 2012.
- [193] K. Vogel, "A comparison of headway and time to collision as safety indicators," *Accident analysis & prevention*, vol. 35, no. 3, pp. 427–433, 2003.
- [194] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [195] L. A. Zadeh, "A theory of approximate reasoning, machine intelligence 9, j. hayes, d. michie, and li mikulich (eds.), 149-194," 1979.
- [196] L. A. Zadeh, "Fuzzy logic= computing with words," *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103–111, 1996.
- [197] J. M. Mendel, "Fuzzy logic systems for engineering : a tutorial," *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, no. 3, pp. 345–377, 1995.
- [198] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," in *Proceedings of the institution of electrical engineers*, vol. 121, pp. 1585–1588, IET, 1974.
- [199] D. G. Schwartz and G. J. Klir, "Fuzzy logic flowers in japan," *IEEE spectrum*, vol. 29, no. 7, pp. 32–35, 1992.
- [200] M. Sugeno, T. Murofushi, T. Mori, T. Tatematsu, and J. Tanaka, "Fuzzy algorithmic control of a model car by oral instructions," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 207–219, 1989.
- [201] M. Sugeno, I. Hirano, S. Nakamura, and S. Kotsu, "Development of an intelligent unmanned helicopter," in *Fuzzy Systems, 1995. International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE Int*, vol. 5, pp. 33–34, IEEE, 1995.
- [202] M. Sugeno, "An introductory survey of fuzzy control," *Information sciences*, vol. 36, no. 1-2, pp. 59–83, 1985.
- [203] J. E. Naranjo, C. González, R. García, and T. De Pedro, "Acc+ stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control," *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 7, no. 2, pp. 213–225, 2006.

- [204] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, and T. De Pedro, "Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 438–450, 2008.
- [205] V. Milanés, J. Pérez, J. Godoy, and E. Onieva, "A fuzzy aid rear-end collision warning/avoidance system," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 10, pp. 9097–9107, 2012.
- [206] F. Herrera and E. Herrera-Viedma, "Linguistic decision analysis : steps for solving decision problems under linguistic information," *Fuzzy Sets and systems*, vol. 115, no. 1, pp. 67–82, 2000.
- [207] J. A. Stover, D. L. Hall, and R. E. Gibson, "A fuzzy-logic architecture for autonomous multisensor data fusion," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 3, pp. 403–410, 1996.
- [208] P. J. Escamilla-Ambrosio and N. Mort, "Multi-sensor data fusion architecture based on adaptive kalman filters and fuzzy logic performance assessment," in *Information Fusion, 2002. Proceedings of the Fifth International Conference on*, vol. 2, pp. 1542–1549, IEEE, 2002.
- [209] A. B. Ajiboye and R. F. Weir, "A heuristic fuzzy logic approach to emg pattern recognition for multifunctional prosthesis control," *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 280–291, 2005.
- [210] L. M. Bergasa, J. Nuevo, M. A. Sotelo, R. Barea, and M. E. Lopez, "Real-time system for monitoring driver vigilance," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 63–77, 2006.
- [211] S. Kammel, J. Ziegler, B. Pitzer, M. Werling, T. Gindele, D. Jagzent, J. Schröder, M. Thuy, M. Goebel, F. v. Hundelshausen, *et al.*, "Team annieway's autonomous system for the 2007 darpa urban challenge," *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 9, pp. 615–639, 2008.
- [212] R. Sukthankarab, D. Pomerleaub, and C. Thorpeb, "A distributed tactical reasoning framework for intelligent vehicles," *environment*, vol. 18, p. 19, 1998.
- [213] M. Ardelt, P. Waldmann, F. Homm, and N. Kaempchen, "Strategic decision-making process in advanced driver assistance systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 7, pp. 566–571, 2010.

- [214] A. Furda and L. Vlacic, “Enabling safe autonomous driving in real-world city traffic using multiple criteria decision making,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2011.
- [215] C. R. Baker and J. M. Dolan, “Traffic interaction in the urban challenge : Putting boss on its best behavior,” in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1752–1758, IEEE, 2008.
- [216] D. A. Pomerleau, “Efficient training of artificial neural networks for autonomous navigation,” *Neural Computation*, vol. 3, no. 1, pp. 88–97, 1991.
- [217] J. Nilsson, J. Silvlin, M. Brannstrom, E. Coelingh, and J. Fredriksson, “If, when, and how to perform lane change maneuvers on highways,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 68–78, 2016.
- [218] J. Wei and J. M. Dolan, “A robust autonomous freeway driving algorithm,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*, pp. 1015–1020, IEEE, 2009.
- [219] J. Wei, J. M. Dolan, and B. Litkouhi, “A prediction-and cost function-based algorithm for robust autonomous freeway driving,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010 IEEE*, pp. 512–517, IEEE, 2010.
- [220] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations,” *Physical review E*, vol. 62, no. 2, p. 1805, 2000.
- [221] A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A. Amditis, U. Scheunert, L. Andreone, and F. Tango, “Dynamic situation and threat assessment for collision warning systems : The euclidean approach,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE*, pp. 636–641, IEEE, 2004.
- [222] H. Jula, E. B. Kosmatopoulos, and P. A. Ioannou, “Collision avoidance analysis for lane changing and merging,” *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2295–2308, 2000.
- [223] J. Li-sheng, F. Wen-ping, Z. Ying-nan, Y. Shuang-bin, and H. Hai-jing, “Research on safety lane change model of driver assistant system on highway,” in *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*, pp. 1051–1056, IEEE, 2009.
- [224] R. V. Cowlagi and P. Tsiotras, “Hierarchical motion planning with dynamical feasibility guarantees for mobile robotic vehicles,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 2, pp. 379–395, 2012.

- [225] E. Plaku, L. E. Kavraki, and M. Y. Vardi, “Motion planning with dynamics by a synergistic combination of layers of planning,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 469–482, 2010.
- [226] M. Werling, S. Kammel, J. Ziegler, and L. Gröll, “Optimal trajectories for time-critical street scenarios using discretized terminal manifolds,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 3, pp. 346–359, 2012.
- [227] M. Ardel, C. Coester, and N. Kaempchen, “Highly automated driving on freeways in real traffic using a probabilistic framework,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1576–1585, 2012.
- [228] J. Nilsson and J. Sjöberg, “Strategic decision making for automated driving on two-lane, one way roads using model predictive control,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, pp. 1253–1258, IEEE, 2013.
- [229] M. Bahram, A. Wolf, M. Aeberhard, and D. Wollherr, “A prediction-based reactive driving strategy for highly automated driving function on freeways,” in *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE*, pp. 400–406, IEEE, 2014.
- [230] B. Krogh and C. Thorpe, “Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles,” in *Robotics and Automation. Proceedings. 1986 IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 1664–1669, IEEE, 1986.
- [231] M. Likhachev and D. Ferguson, “Planning long dynamically feasible maneuvers for autonomous vehicles,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 8, pp. 933–945, 2009.
- [232] F. M. Marchese, “Multiple mobile robots path-planning with mca,” in *Autonomic and Autonomous Systems, 2006. ICAS’06. 2006 International Conference on*, pp. 56–56, IEEE, 2006.
- [233] B. Gutjahr, L. Gröll, and M. Werling, “Lateral vehicle trajectory optimization using constrained linear time-varying mpc,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 6, pp. 1586–1595, 2017.
- [234] J. Reeds and L. Shepp, “Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards,” *Pacific journal of mathematics*, vol. 145, no. 2, pp. 367–393, 1990.
- [235] J. Funke, P. Theodosis, R. Hindiyeh, G. Stanek, K. Kritatakirana, C. Gerdes, D. Langer, M. Hernandez, B. Müller-Bessler, and B. Huhnke, “Up to the limits : Autonomous audi tts,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, pp. 541–547, IEEE, 2012.

- [236] D. G. Bautista, *Functional architecture for automated vehicles trajectory planning in complex environments*. PhD thesis, PSL Research University, 2017.
- [237] A. Takahashi, T. Hongo, Y. Ninomiya, and G. Sugimoto, “Local path planning and motion control for agv in positioning,” in *Intelligent Robots and Systems’ 89. The Autonomous Mobile Robots and Its Applications. IROS’89. Proceedings., IEEE/RSJ International Workshop on*, pp. 392–397, IEEE, 1989.
- [238] I. Papadimitriou and M. Tomizuka, “Fast lane changing computations using polynomials,” in *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, vol. 1, pp. 48–53, IEEE, 2003.
- [239] J. Daniel, *Trajectory generation and data fusion for control-oriented advanced driver assistance systems*. PhD thesis, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2010.
- [240] D. Koller, K. Daniilidis, and H.-H. Nagel, “Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes,” *International Journal of Computer 11263on*, vol. 10, no. 3, pp. 257–281, 1993.
- [241] R. Schubert, E. Richter, and G. Wanielik, “Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking,” in *Information Fusion, 2008 11th International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2008.
- [242] V. Arvind, “Optimizing the turning radius of a vehicle using symmetric four wheel steering system,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 4, no. 12, pp. 2177–2184, 2013.
- [243] V. Sezer and M. Gokasan, “A novel obstacle avoidance algorithm : Follow the gap methode,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 9, pp. 1123 – 1134, 2012.
- [244] C. Sentouh, A.-T. Nguyen, M. A. Benloucif, and J.-C. Popieul, “Driver-automation cooperation oriented approach for shared control of lane keeping assist systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, no. 99, pp. 1–17, 2018.
- [245] M. Della Penna, M. M. van Paassen, D. A. Abbink, M. Mulder, and M. Mulder, “Reducing steering wheel stiffness is beneficial in supporting evasive maneuvers,” in *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 1628–1635, IEEE, 2010.
- [246] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media, 2011.

- [247] N. M. Enache, *Assistance préventive à la sortie de voie*. PhD thesis, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2008.
- [248] X. Huang, H. Zhang, G. Zhang, and J. Wang, "Robust weighted gain-scheduling \mathcal{H}_∞ vehicle lateral motion control with considerations of steering system backlash-type hysteresis," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 1740–1753, 2014.
- [249] R. Marino, S. Scalzi, and M. Netto, "Nested pid steering control for lane keeping in autonomous vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 12, pp. 1459–1467, 2011.
- [250] J. P. Hespanha and A. S. Morse, "Switching between stabilizing controllers," *Automatica*, vol. 38, no. 11, pp. 1905–1917, 2002.
- [251] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear matrix inequalities in system and control theory*. SIAM, 1994.
- [252] H. D. Tuan, P. Apkarian, T. Narikiyo, and Y. Yamamoto, "Parameterized linear matrix inequality techniques in fuzzy control system design," *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 9, no. 2, pp. 324–332, 2001.
- [253] N. Kaptein, J. Theeuwes, and R. Van Der Horst, "Driving simulator validity : Some considerations," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, no. 1550, pp. 30–36, 1996.
- [254] M. Benloucif, C. Sentouh, J. Floris, P. Simon, S. Boverie, and J. Popieul, "Cooperation between the driver and an automated driving system taking into account the driver's state," in *Driving Simulation and Virtual Reality, 15th International Conference*, 2016.
- [255] A. Kemeny and F. Panerai, "Evaluating perception in driving simulation experiments," *Trends in cognitive sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 31–37, 2003.
- [256] A. Mas, *Utilisation des simulateurs de conduite pour l'évaluation des systèmes d'aide à la conduite en situation d'urgence*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2012.
- [257] J. Östlund, B. Peters, B. Thorslund, J. Engström, G. Markkula, A. Keinath, D. Horst, S. Juch, S. Mattes, and U. Foehl, "Driving performance assessment-methods and metrics," 2005.

-
- [258] D. V. McGehee, J. D. Lee, M. Rizzo, J. Dawson, and K. Bateman, “Quantitative analysis of steering adaptation on a high performance fixed-base driving simulator,” *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 7, no. 3, pp. 181–196, 2004.
- [259] M. Beggiato and J. F. Krems, “The evolution of mental model, trust and acceptance of adaptive cruise control in relation to initial information,” *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, vol. 18, pp. 47–57, 2013.
- [260] M. Benloucif, C. Sentouh, J. Floris, P. Simon, and J.-C. Popieul, “Online adaptation of the level of haptic authority in a lane keeping system considering the driver’s state,” *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2017.