



**THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1**  
*sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne*

pour le grade de  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1**  
*Mention: Traitement du Signal et Télécommunications*

**Ecole doctorale MATISSE**

présentée par

**Flavien Hervé SOMDA**

préparée à l'unité de recherche n° 6164  
Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes  
Structure et Propriété de la matière (SPM)

---

**DEVELOPPEMENT  
DE STRATEGIES DE  
COMMANDE ET DE  
PERCEPTION POUR  
UNE REGULATION  
DE VITESSE  
INTELLIGENTE**

**Thèse soutenue à Rennes  
le 26 novembre 2009**

devant le jury composé de :

**Marc HEDDEBAUT**

Directeur de Recherche INRETS/ *rapporteur*

**Xavier MOREAU**

Professeur, LAPS, Université Bordeaux1/ *rapporteur*

**Loïc FRADIN**

Ingénieur PSA Peugeot-Citroën/ *examinateur*

**Hervé CORMERAIS**

Professeur à Supélec/encadrant

**Olivier LAFOND**

Maître de conférence, IETR, Université de  
Rennes1/Encadrant, invité

**Jean BUISSON**

Professeur à Supélec / *directeur de thèse*

**Mohamed HIMDI**

Professeur, IETR, Université de Rennes1/co-  
*directeur de thèse*

**Xavier BUNLON**

Ingénieur Renault/ invité



# Remerciements

Je voudrais ici remercier l'ensemble des personnes qui ont permis et favoriser d'une manière ou d'une autre le bon déroulement de cette thèse.

Mes remerciements vont en particulier à Monsieur Jean Buisson qui a été le directeur de cette thèse et qui a permis des discussions fructueuses. Mes remerciements à Mohamed Himdi qui a co-dirigé cette thèse en y déployant sa grande humanité et son humeur joviale. J'aimerais également manifester ici ma grande reconnaissance vis à vis de Monsieur Hervé Cormerais qui m'a encadré tout au long de cette thèse et dont la grande disponibilité et l'implication ont rendu le déroulement de ce travail très agréable. Bien sûr, mes sincères remerciements à Monsieur Olivier Lafond qui a également co-encadré ces travaux et faciliter à bien des égards une collaboration fructueuse dans une atmosphère très détendue. Je pense aussi à Monsieur Laurent Le-Coq, responsable des mesures à l'IETR grâce à qui la réalisation des mesures de SER a été possible. Je le remercie également pour le partage qu'il a su faire de sa bonne humeur tout au long de cette collaboration. Je remercie Monsieur Hervé Guéguen, responsable de l'équipe Automatique des Systèmes Hybrides pour les précieuses pistes qu'il m'a données au cours de cette thèse.

J'adresse mes remerciements aux membres de mon Jury, à Monsieur Xavier Moreau, professeur à l'Université Bordeaux 1 pour avoir bien voulu accepté de le présider et de rapporter sur cette thèse, à Monsieur Marc Heddebaut, directeur de recherche à l'INRETS d'avoir également accepté d'être rapporteur, à Messieurs Loïc Fradin et Xavier Bunlon respectivement ingénieurs de recherche chez PSA Peugeot-Citroën et Renault pour leurs conseils très avisés et leurs remarques fructueuses.

Un grand merci à mes amis, à la communauté burkinabé et à la chorale Interpeuples dont je suis membre, pour leur soutien constant et leur grande mobilisation lors de la soutenance de cette thèse. Je voudrais particulièrement remercier les familles Desbrousses, Ouédraogo et Zabré pour leur présence à chaque étape de mon parcours à Rennes, remercier Adama Forgo, Désiré Guel, François Nandziga, Galiem Ouédraogo, Houda Diallo, Inessa Séré, Mukasa Nikiéma, Sandra Loya, Sosthène Yaméogo, Souleymane Kaboré, Valérie Traoré, Yann Sanou, Youssouf Samaté pour leur précieuse amitié et leurs contributions, Anta Calvès, Eléonore Koalla, Hubert Stalin, Monique Gentric et les familles Lastique et Héma pour leur remarquable soutien. Un remerciement spécial à Nadège Soma pour son importante présence et ses multiples encouragements.

Bien évidemment, mes chaleureux remerciements à ma famille pour son soutien et ses encouragements indéfectibles. Je voudrais en profiter pour lui témoigner toute ma reconnaissance et mon amour.

# Résumé

Ce document est un rapport de thèse de doctorat de l'Université de Rennes1, effectuée entre octobre 2006 et octobre 2009 au sein des laboratoires de l'*Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes* (I.E.T.R). Deux équipes de recherche ont pris part aux travaux de cette thèse. Il s'agit de l'équipe *Automatique des Systèmes Hybrides* de Supélec et de l'équipe *Antennes et Hyperfréquences*.

Ce travail collaboratif entre deux équipes aux compétences parallèles a porté sur le développement d'une stratégie de commande pour un régulateur de vitesse intelligent et apporté les contributions suivantes :

- Proposition d'un nouveau modèle de référence et de deux stratégies de commande associées pour le contrôle de l'inter-distance véhiculaire. Ces stratégies sont démontrées sûres, confortables, robustes, stables en chaînes et compatibles avec les applications ACC (Adaptive Cruise Control) et Stop&Go. Le modèle de référence proposé est un modèle exponentiel du second ordre qui permet de contrôler l'accélération du véhicule équipé pour réguler l'inter-distance en fonction de la stratégie de contrôle mise en œuvre.
- Etude de la stabilité en chaîne de véhicules sans hypothèses sur les politiques d'inter-distance des véhicules mis en jeu. Cette étude propose de nouvelles définitions pour étendre certaines propriétés de stabilité en chaîne dans le cas de files incluant des véhicules dont la politique d'inter-distance est fortement non linéaire ; elle évalue également les performances de la stratégie de commande proposée vis-à-vis de la notion de stabilité en chaîne.
- Proposition d'une nouvelle technique de caractérisation des scénarios d'un trafic routier sur la base de système radar avec dépointage de faisceau, la démonstration de l'intérêt d'une stratégie de détection radar par dépointage de faisceau par rapport à une stratégie radar fixe, ainsi que l'évaluation de la distribution de SER (Surface Equivalente Radar) sur certains véhicules.

**mots clés :** commande longitudinale, distance de sécurité, modèle de référence, détection par dépointage de faisceau, SER.

# Abstract

This document is a report of Université de Rennes1 ph.D Thesis that took place from October 2006 to October 2009 within the laboratories of *Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes* (I.E.T.R.). Two research teams contributed actively to this work : These are the team *Automatique des systèmes Hybrides* (Hybrid systems control) of Supélec and the team *Antennes et Hyperfréquences* (Antennas and microwaves).

This two-team-collaboration work aimed to develop a new longitudinal control strategy for intelligent cruise control and yielded the following contributions :

- Development of a new reference model and two associated strategies for longitudinal cruise monitoring. The strategies are proven safe, comfortable, robust, string stable and suitable for stop&Go applications. The offered reference model is second order and exponential model that governs acceleration of a controlled vehicle to meet inter-distance policy defined by the strategy that is implemented.
- Vehicles string stability analysis. The study presented results on strings including vehicles with any kind of inter-distance policy. New definitions are also offered to extend some string stability properties to chains including vehicles with no linear cruise control policy. Eventually, the performances of the offered control strategy are evaluated with respect to the notion of string stability.
- Development of a new technic for traffic scenarios information extraction using scanning radars. The study also shows the enhancements brought by a scanning detection strategy in comparison with a non scanning one, especially as far as curved roads are concerned. RCS (Radar Cross Section) distribution measurements on some vehicles are also available for the community of Intelligent Transportation Systems (ITS).

**Keywords :** longitudinal control, safe distance, reference model, scanning detection, RCS.



# Table des matières

<b>Glossaire sur les systèmes d'aide à la conduite</b>	<b>9</b>
<b>Introduction</b>	<b>13</b>
<b>1 Les systèmes intelligents d'aide à la conduite : Etat de l'art</b>	<b>15</b>
1.1 Introduction . . . . .	15
1.2 Perception de l'environnement . . . . .	16
1.2.1 La perception passive . . . . .	16
1.2.2 La perception active . . . . .	17
1.2.2.1 Détecteurs à infrarouge [4] . . . . .	17
1.2.2.2 Les capteurs ultrasoniques ou SONAR (SOund NAVigation Ranging) [4] . . . . .	18
1.2.2.3 Les détecteurs optiques LIDAR (LIght Detection and Ranging) [4] . . . . .	18
1.2.2.4 Détecteurs RADAR (RAdio Detection And Ranging) . . . . .	19
Principe Global de la détection par radar [5] . . . . .	20
Importance de la surface équivalente radar . . . . .	21
Architecture des systèmes radar . . . . .	21
1.2.3 Systèmes de mesure de la position angulaire . . . . .	29
1.2.3.1 Balayage mécanique de faisceau [9] . . . . .	29
1.2.3.2 Balayage par commutation [9] . . . . .	29
1.2.3.3 Balayage par système monopulse [19] . . . . .	30
1.2.3.4 Balayage électronique . . . . .	32
1.3 Interprétation des données issues de la perception . . . . .	33
1.3.1 Les systèmes de contrôle intelligents . . . . .	34
1.3.2 Les politiques d'inter-distance de sécurité . . . . .	38
1.3.2.1 Politiques basées sur des modèles de distance de sécurité . . . . .	39
1.3.2.2 Politiques d'inter-distance basées sur Stimulus-réponse . . . . .	41
1.3.2.3 Politiques d'inter-distance basées sur la notion de Psycho-espacement . . . . .	42
1.3.2.4 Politiques d'inter-distance utilisant les automates cellulaires . . . . .	43
1.3.2.5 Politiques d'inter-distance basées sur la logique floue et les réseaux de neurones . . . . .	44
1.3.2.6 Politiques d'inter-distance basées sur micro simulation . . . . .	46
1.4 La stabilité en chaîne . . . . .	46
1.5 Conclusion . . . . .	50

<b>2</b>	<b>Stratégie de contrôle de l'inter-distance véhiculaire</b>	<b>52</b>
2.1	Introduction . . . . .	52
2.2	Généralités sur la stratégie de commande . . . . .	54
2.2.1	Notations et hypothèses . . . . .	54
2.2.2	Objectifs et Principe de la stratégie de commande . . . . .	55
2.3	Contrôle du véhicule suiveur . . . . .	55
2.3.1	Le modèle de référence . . . . .	55
2.3.2	Consistance de la stratégie face aux questions de sécurité - détermination de $d_0$ . . . . .	56
2.3.3	Etude en régime stationnaire . . . . .	59
2.3.4	Le confort . . . . .	62
2.3.5	Compatibilité Stop&Go de la stratégie . . . . .	66
2.3.5.1	Stop&Go en milieu non bruité . . . . .	66
2.3.5.2	Stop&Go en milieu bruité . . . . .	67
2.4	Robustesse du modèle vis-à-vis des bruits de mesure . . . . .	68
2.4.1	Etude de l'influence des erreurs de mesures simples . . . . .	69
2.4.1.1	Erreur de mesure constante sur $d$ . . . . .	69
2.4.1.2	Erreur de mesure proportionnelle sur $d$ . . . . .	69
2.4.1.3	Erreur de mesure proportionnelle sur $\dot{d}$ . . . . .	70
2.4.2	Etude de l'influence des erreurs de mesures combinées . . . . .	71
2.4.2.1	Erreur de mesure constante $\epsilon_d$ sur $d$ combinée à une erreur de mesure proportionnelle $r_2$ sur $\dot{d}$ . . . . .	71
2.4.2.2	Erreur de mesure proportionnelle $r_1$ sur $d$ combinée à une erreur de mesure proportionnelle $r_2$ sur $\dot{d}$ . . . . .	72
2.5	Influence des paramètres $\alpha$ et $c$ et auto-adaptativité de la stratégie . . . . .	73
2.5.1	Influence des paramètres $\alpha$ et $c$ . . . . .	73
2.5.2	Politique d'inter-distance de sécurité optimale . . . . .	74
2.5.3	Une stratégie capable d'auto-adaptativité . . . . .	75
2.6	Stratégie à taux de freinage du véhicule leader fini . . . . .	78
2.7	Prise en compte de la condition initiale . . . . .	81
2.8	Conclusion . . . . .	82
<b>3</b>	<b>Etude de la stabilité en chaîne</b>	<b>84</b>
3.1	Introduction . . . . .	84
3.2	Formalisation du problème de stabilité en chaîne . . . . .	85
3.3	Caractérisation des chaînes de véhicules . . . . .	86
3.4	Stabilité en chaîne . . . . .	88
3.4.1	Stabilité en environnement uniforme . . . . .	88
3.4.2	Stabilité en environnement mixte . . . . .	89
3.4.3	Marge de stabilité d'une stratégie de référence . . . . .	91
3.4.4	Marge de stabilité d'une sous-chaîne stable par rapport à une politique instable : . . . . .	92
3.5	Instabilité en chaîne de la conduite manuelle . . . . .	92
3.6	Stabilité de la stratégie de contrôle longitudinal proposée au chapitre 2 . . . . .	95
3.6.1	Stabilité en chaîne de la politique proposée en simulation . . . . .	95
3.6.2	Influence de la stratégie dans un environnement mixte . . . . .	99



3.7	Conclusion . . . . .	104
<b>4</b>	<b>Identification de scénarios par dépointage du faisceau de l'antenne radar</b>	<b>106</b>
4.1	Introduction . . . . .	106
4.2	Hypothèses générales . . . . .	107
4.3	Scénarios de trafic sur route droite . . . . .	108
4.3.1	Extraction de données pertinentes . . . . .	108
4.3.2	Identification des scénarios . . . . .	111
4.4	Scénarios de trafic sur routes courbes . . . . .	111
4.4.1	Bénéfice du dépointage du faisceau d'antenne sur la visibilité-Détection du véhicule cible sur la voie du véhicule contrôlé . . . . .	111
4.4.2	Détection du véhicule cible sur une voie quelconque . . . . .	114
4.4.3	Identification des scénarios . . . . .	115
4.5	Evaluation de la distribution de SER . . . . .	117
4.5.1	Estimation de la distribution de SER par simulation . . . . .	117
4.5.2	Procédure de mesure de la distribution de SER . . . . .	119
4.5.3	Résultats des mesures de la distribution de SER . . . . .	120
4.5.4	Apports du dépointage dans la détection radar . . . . .	122
4.6	Apports potentiels du dépointage de faisceau d'antenne dans les stratégies proposées . . . . .	128
4.6.1	Apports sur la stratégie à taux de freinage infini . . . . .	128
4.6.2	Apports sur la stratégie à taux de freinage fini . . . . .	130
4.7	Conclusion . . . . .	130
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>132</b>
4.8	Résultats . . . . .	132
4.9	Perspectives . . . . .	133
	<b>Annexe A</b>	<b>136</b>
	<b>Annexe B</b>	<b>138</b>



# Glossaire sur les systèmes d'aide à la conduite

**ABS** : Initiales allemandes pour Anti Blockier System, ce dispositif de frein anti-blocage utilise des capteurs de vitesse au niveau des roues pour déterminer si une ou plusieurs roues tentent de se bloquer au cours du freinage. Le cas échéant, des soupapes hydrauliques limitent ou réduisent le freinage sur les roues concernées. Ce dispositif permet donc de lutter contre le dérapage et facilite le maintien du contrôle de la direction.

**ACC** : Initiales pour Adaptive Cruise Control, ce terme désigne le régulateur de vitesse gérant l'inter-distance avec le véhicule qui précède. L'usage d'un radar à ondes millimétriques permet d'évaluer la position et la vitesse relatives du véhicule précédent. Une régulation intervient par action sur l'accélérateur et les freins pour maintenir entre les deux véhicules une distance qui respecte les contraintes de sécurité définies dans la stratégie implémentée dans le dispositif.

**ADAS** : Advanced Driver Assistance Systems. Ce sont les technologies embarquées à bord du véhicule et dont le rôle est d'améliorer la sécurité en apportant une aide au conducteur. Ils peuvent consister à lutter contre les collisions, à contrôler l'inter-distance véhiculaire, à donner des alertes d'approche de virage...

**AFS** : Advanced Frontline System. C'est un concept d'éclairage intelligent qui permet d'adapter l'éclairage dans les virages, à la vitesse et aux conditions météorologiques.

**ASC** : Ces initiales désignent Automatic Stability Control. Ce système analyse les forces de contact longitudinales qui se produisent lors d'une opération de conduite. Ce système permet d'optimiser l'énergie de traction sur les roues motrices lors d'un processus d'accélération en sortie de virage et dans d'autres situations critiques. Par exemple, lors d'une opération de conduite, si une roue a une bonne traction et que l'autre se trouve sur une partie glissante de la chaussée, cette dernière est freinée jusqu'à ce qu'elle puisse atteindre une surface de la chaussée qui lui permette une bonne traction.

**ASR** : Cet acronyme signifie Anti Slip Regulation. Le dispositif anti-patinage optimise la traction à n'importe quelle vitesse en limitant les effets de patinage par exploitation du système de freinage et des paramètres de gestion du moteur du véhicule.

**BAS** : Brake Assist System. C'est un système de sécurité qui permet de renforcer l'intensité de freinage dans les situations d'urgence.

**CBC** : Cornering Brake Control. Ce dispositif fait partie du système **ABS**. Il contrôle le freinage dans un virage pour éviter les décrochages du train arrière du véhicule. Le **CBC** agit de manière indépendante sur les roues pour les faire freiner de façon optimale. Il se déclenche généralement avant l'action de l'**ABS**.

**DSC** : Dynamic Stability Control. C'est un système de commande de suspension qui est plus complexe et qui assure les fonctionnalités cumulées du dispositif de frein antiblocage (**ABS**), la commande de frein **CBC**, et la commande automatique de stabilité et de traction (**ASC+ASR**).

**ESP** : Electronic Stability Program. Ce système aide le véhicule à maintenir la trajectoire voulue par le conducteur. Il détecte la moindre tendance au dérapage qu'il corrige en agissant sur une ou plusieurs roues par l'intermédiaire du système de freinage et du moteur. Son fonctionnement peut être décrit comme suit : si le véhicule lors d'un virage pris à trop grande vitesse perd de l'adhérence, l'**ESP** intervient en faisant freiner la roue arrière intérieure pour rétablir la trajectoire du véhicule en cas de sous-virage (le véhicule à tendance à aller tout droit dans le virage) ou en faisant freiner la roue arrière extérieure en cas de survirage (le train arrière du véhicule décroche et induit une tendance tête-à-queue). Au besoin, ce système peut agir également sur les autres roues.

**FDR** : Initiales allemandes de Système de Commande de Manipulation Dynamique. C'est un dispositif très similaire au **VDC**.

**GPS** : Global Positioning System. Le GPS est un système de navigation basé sur un ensemble de satellites dont l'accès est autorisé aux civils. Ce système a été mis en œuvre par le département de la défense américaine. Le système **GPS** comporte 24 satellites répartis sur 6 orbites à une altitude de 20000km. Il permet de localiser avec précision un endroit quelconque du monde. Une localisation en trois dimensions (latitude, longitude et altitude) nécessite de pouvoir capter au moins quatre satellites du système. Trois satellites suffisent pour localiser un point par sa latitude et sa longitude, le quatrième donne en plus l'information sur son altitude. Le GPS est très couramment employé dans les applications automobiles.

**GSM** : Global System for Mobile Communication. Il s'agit d'un système mobilephone adopté dans plus de 200 pays dans le monde pour les communications sans fil. Ce système peut servir à communiquer la position du véhicule prise par le GPS.

**ITS** : Intelligent Transport Systems. Ils désignent l'ensemble des applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. Ces technologies incluent à la fois les communications sans fil (GSM, UMTS, GPRS par exemple), les technologies de calcul (intelligence artificielle, systèmes embarqués...), de localisation (le GPS) ainsi que les capteurs (radar, lidar, caméra ...).

**VDC** : Vehicle Dynamic Control. Il s'agit d'un système de contrôle qui intervient dès que la stabilité de la voiture risque d'être compromise. Il aide le conducteur à maîtriser

son véhicule mais n'intervient qu'au moment où la perte de stabilité devient une réalité critique.

**V2V** : Vehicle-to-vehicle. Communication de véhicule à véhicule basée sur des protocoles de communication sans fil souvent dédiés. Ces communications permettent la prise en compte d'un volume important d'informations dans la gestion de la conduite.

**V2I** : Vehicle-to-infrastructure. Il s'agit de la communication véhicule-infrastructure. Le but comme dans le V2V est de permettre aux usagers de disposer d'informations importantes et étendues sur le trafic.

**4WD** : Four Wheel Drive. Il s'agit de véhicules avec 4 roues motrices.

**4WS** : Four Wheel Steering. C'est un système de direction qui agit sur les 4 roues du véhicule.



# Introduction

La mondialisation et le besoin de coopération des peuples et des individus entraînent un développement rapide des moyens modernes de transport. Il est plus que jamais nécessaire de réduire les distances entre les populations ; et si l'avènement des systèmes de télécommunications symbolise d'une certaine manière l'aboutissement de cette nécessité contemporaine, les performances atteintes dans les moyens de transport n'en sont pas moins représentatives.

Aujourd'hui, il est de plus en plus question de systèmes de transport sûrs, confortables, optimisés et cohérents avec la protection de l'environnement. D'aucuns pensent que l'adjonction aux moyens de transport disponibles, de technologies de communication et de dispositifs de traitements temps-réels intelligents, constituerait une excellente approche pour atteindre ces objectifs. En clair, il s'agit de doter les moyens de transports actuels d'outils qui leur fassent prendre part dans une certaine mesure au moins à leur conduite.

Dans le cas particulier de l'automobile, les progrès réalisés en la matière sont nombreux et extrêmement rapides. De grands projets fortement innovateurs ont vu le jour. Les programmes PREDIT (Programme Interministériel de Recherche et d'Innovation) en France, IVI (Intelligent Vehicle Initiative) aux Etats-Unis et Smart Cruise Systems au Japon sont de grands succès aussi bien des points de vue scientifique, technologique qu'économique.

Il faut reconnaître en effet, que les conditions actuelles de transport, démontrent par elles-mêmes une urgence certaine à intervenir dans la sécurisation des routes par des moyens autres que simplement la répression, l'éducation et la sensibilisation des conducteurs. D'après un rapport de IEEE Spectrum [1], chaque minute dans le monde, au moins une personne meurt dans un accident de voiture. De nombreuses études prouvent que dans bon nombre de ces catastrophes, la responsabilité directe du conducteur est engagée. En proposant l'équipement des véhicules par des technologies intelligentes d'aide à la conduite, le but recherché, loin de consister à déresponsabiliser l'utilisateur, est de lui faciliter la tâche de conduite en comblant ses déficits de perception et ses lacunes décisionnelles, le cas échéant.

Bien sûr, parvenir à concevoir et rendre fonctionnels de tels systèmes est un défi énorme qui requiert des compétences multidisciplinaires. En fait, la conduite automobile met en jeu une relation tripartite formée du conducteur, du véhicule et de l'infrastructure routière [2]. Aussi les systèmes d'aide à la conduite agissent-ils sur le conducteur en influençant son comportement grâce aux signaux d'alerte sur les conditions du trafic (les systèmes d'avertissements), sur le véhicule en prenant en main la dynamique de celui-ci (les régulateurs de vitesse par exemple), et sur l'infrastructure en lui communiquant et en y extrayant des informations (systèmes en milieux coopératifs par exemple).

Dans les systèmes conçus pour prendre en main, au besoin, la dynamique du véhicule, plusieurs niveaux de traitements sont à considérer : la perception de l'environnement (généralement au moyen d'un système radar), l'interprétation des signaux issus de la perception, la décision et l'action sur la base d'une politique clairement définie (cf FIG.1).

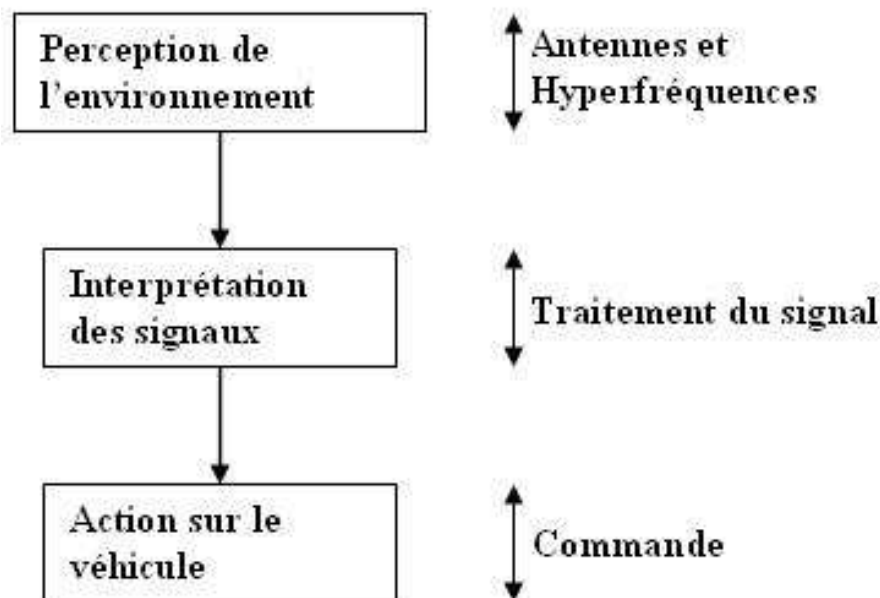


FIG. 1 – *Processus de l'intelligence véhiculaire*

Nous proposons dans cette thèse une stratégie de commande de l'inter-distance véhiculaire définie sur la base de critères d'anticollision ainsi qu'une stratégie de détection de cible par dépointage de faisceau en démontrant les bénéfices. Le travail est organisé en quatre chapitres : Le premier d'entre eux présente l'état de l'art des systèmes de perception, des systèmes intelligents d'aides à la conduite, des politiques de gestion d'inter-distance et des approches utilisées pour garantir la stabilité des chaînes de véhicules. Le second chapitre présente la stratégie de commande de l'inter-distance que nous proposons, en la décrivant du point de vue de la sécurité, du confort, et de la robustesse vis-à-vis de certaines erreurs de mesure. La compatibilité de l'approche avec les applications Stop&Go est également démontrée dans cette partie. Le troisième chapitre présente les résultats d'une étude générale sur la stabilité d'une chaîne de véhicules quelconque et applique ces résultats au cas particulier de la politique d'inter-distance proposée, en comparant les performances de celle-ci avec celles d'autres stratégies dans des situations particulières. Enfin le quatrième chapitre étudie l'influence d'un système à dépointage de faisceau sur la détection des cibles mobiles et ses bénéfices sur une régulation de vitesse automatique.

Cette étude a apporté comme contributions, deux nouvelles stratégies de commandes de l'inter-distance véhiculaire, des résultats généraux sur la stabilité en chaînes de véhicules avec des définitions nouvelles pour prendre en compte les politiques de commande non linéaires et l'étude de l'effet du dépointage de faisceau d'antenne dans la perception des cibles mobiles.



# Chapitre 1

## Les systèmes intelligents d'aide à la conduite : Etat de l'art

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Perception de l'environnement</b>	<b>16</b>
1.2.1	La perception passive	16
1.2.2	La perception active	17
1.2.3	Systèmes de mesure de la position angulaire	29
<b>1.3</b>	<b>Interprétation des données issues de la perception</b>	<b>33</b>
1.3.1	Les systèmes de contrôle intelligents	34
1.3.2	Les politiques d'inter-distance de sécurité	38
<b>1.4</b>	<b>La stabilité en chaîne</b>	<b>46</b>
<b>1.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>50</b>

---

### 1.1 Introduction

Un véhicule automobile sert à réaliser des opérations de transport de passagers sur une infrastructure routière, cette infrastructure étant elle-même partagée par d'autres véhicules automobiles et même d'autres systèmes de transport. Jusqu'à récemment, ces moyens de transport n'étaient pas dotés de systèmes de perception et le pilote humain, de part ses dispositions physiologiques, constituait l'intégralité des capteurs extéroceptifs du véhicule (capteurs renseignant sur l'environnement externe au véhicule). Il repérait l'obstacle, le localisait, estimait sa vitesse, évaluait les risques et entreprenait les manoeuvres idoines pour éviter les dangers. Du fait de ce dénuement initial, l'automobile constitue un immense domaine de recherche pour l'automaticien. La FIG.1.1 illustre la dimension des interventions attendues. Aussi, depuis plusieurs années déjà, des programmes de recherche sont-ils lancés, sollicitant une collaboration multidisciplinaire de plus en plus prononcée. Derrière cette course effrénée vers l'autonomie du véhicule automobile, résident, solides, des objectifs pressants d'un trafic sûr et fluide. Mais peut-il y avoir autonomie sans moyen de perception ?

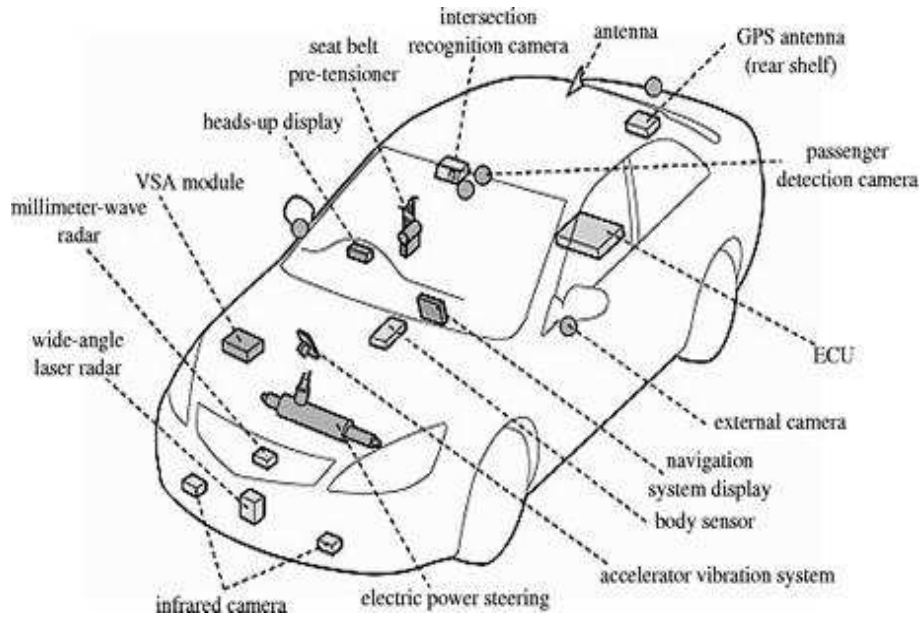


FIG. 1.1 – *Capteurs pour le contrôle automobile [3]*

## 1.2 Perception de l'environnement

L'observation de l'environnement du véhicule est une opération incontournable dans la progression vers une automobile intelligente. Un système de collecte d'informations est donc indispensable. Plusieurs réalisations sont proposées. Dans certains cas, les systèmes de perception disposent d'un émetteur dont la récupération du signal rayonné sur l'obstacle permet de localiser ce dernier, on dit que ces systèmes sont actifs. Au contraire, certains systèmes reposent sur un émetteur naturel comme la lumière et se contentent donc de récupérer le signal dans le milieu ambiant, on dit qu'il s'agit de systèmes passifs.

### 1.2.1 La perception passive

Cette perception repose essentiellement sur la stéréovision (voir [16]) qui consiste à utiliser plusieurs caméras pour analyser la scène d'intérêt. Généralement, il s'agit de munir le véhicule de deux ou plusieurs caméras embarquées d'axes parallèles placées sur les bords de celui-ci. Le principe est fondé sur la comparaison de deux images prises simultanément par les deux caméras. En déterminant les éléments caractéristiques des deux images et en les analysant par un traitement d'image, on est à même de préciser la position d'un éventuel obstacle. D'autre part une comparaison des images successives permet de déduire la vitesse relative de l'obstacle, ce qui permet d'anticiper sur un freinage d'urgence. Okada et al proposent dans [17] une technique de détection de cibles automobiles utilisant une seule caméra. La progression de la cible est alors évaluée par un algorithme basé sur un ensemble de lignes repérées sur la cible. La détection par caméra est très limitée par le brouillard et toutes les autres conditions de mauvaise visibilité. Un autre inconvénient majeur des systèmes de détection par caméra réside dans la lourdeur du traitement des images [18]. En effet, ces systèmes nécessitent généralement l'emploi de puissants processeurs pour un traitement en temps réel des images récoltées. La détection

par caméra peut être employée en complément des radars pour la détection sur courte portée du fait de sa limitation par les conditions de mauvaise visibilité.

TAB. 1.1 – Performances de la détection par caméra

<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
Portée moyenne	Grande sensibilité aux conditions météorologiques
Performances de détection moyennes	Coût élevé
	Traitement de données lourd
	Encombrement

## 1.2.2 La perception active

La perception active est basée sur les capteurs actifs qui sont en même temps émetteurs et récepteurs de rayonnements. On distingue plusieurs technologies de capteurs. Une description de ces capteurs est donnée ci-dessous.

### 1.2.2.1 Détecteurs à infrarouge [4]

Ces détecteurs utilisent des capteurs photoélectriques. Ils sont efficaces contre les perturbations liées à la lumière du soleil. Ces systèmes sont essentiellement utilisés pour attester ou nier la présence d'un obstacle. Ils ne permettent pas d'avoir directement des informations sur la distance ou la vitesse de l'obstacle en cas de présence. Toutefois, on peut, en définissant des seuils pour le niveau du signal de retour par rapport au signal d'émission, situer en cas de présence d'obstacle, la position relative de celui-ci. Certains systèmes utilisant des capteurs pyroélectriques (capteurs détectant la variation de polarisation électrique causée par un changement de température dans certains matériaux) sont capables de mesurer l'énergie pyroélectrique de l'obstacle et pourraient de ce fait être utiles pour la détection de présence humaine. Cependant les températures d'objets ambiants comme les ampoules peuvent fausser ces détections.

TAB. 1.2 – Performances de la détection par infrarouge

<b>Points forts</b>	<b>Points faibles</b>
Longue portée	sensible à l'environnement
Coût abordable	performances de détection limitée
Peu encombrant	
Poids léger	

### 1.2.2.2 Les capteurs ultrasoniques ou SONAR (SOund NAvigation Ranging) [4]

Ce sont des capteurs fondés sur l'exploitation d'ultrasons que l'on envoie contre la cible à une fréquence d'environ 20 KHz. Ces ondes ont une fréquence supérieure à la limite d'audibilité. La mesure de l'intervalle de temps aller-retour de l'onde ainsi que la connaissance de la vitesse de propagation de l'onde permettent aisément de déterminer la distance à l'obstacle par l'opération

$$distance = \frac{vitesse * temps}{2} \quad (1.1)$$

Ce type de détecteur ne présente d'intérêt que pour son coût et sa facilité de réalisation. Sa sensibilité aux aléas climatiques et au bruit environnant en limite fortement l'utilisation. La télémétrie ultrasonore est plutôt employée dans des opérations de mesure à distance faible comme la détection de murs et l'aide au stationnement.

TAB. 1.3 – Performances de la détection par ultrasons

Points forts	Points faibles
Réalisation simple	Mauvaise résolution angulaire (grande ouverture)
Coût abordable	Précision de détection sujette à la température
Traitement simple des données	Sensibilité aux conditions météorologiques

### 1.2.2.3 Les détecteurs optiques LIDAR (LIght Detection and Ranging) [4]

Ces systèmes sont conçus à l'aide de lasers rayonnant dans le visible et surtout l'infrarouge. La très faible longueur des ondes optiques fait de ces appareils des systèmes de grande résolution spatiale. Il y a deux façons d'utiliser ces ondes : on peut les envoyer par impulsions comme dans le cas des sonars et radars où on analyse le signal réfléchi pour extraire des informations sur l'obstacle. On peut aussi envoyer les ondes de façon continue auquel cas on mesure le déphasage entre l'onde envoyée et celle de retour pour déduire les caractéristiques dynamiques de l'obstacle. Ce système qui est de grande précision est en plus de bas coût. Cependant il est très sensible aux conditions météorologiques (pluie, neige, brouillard...) et présente une interférence avec les rayons solaires.

TAB. 1.4 – Performances de la détection par lidar

Points forts	Points faibles
Longue portée	Dérèglements fréquents
Grande précision	Grande sensibilité aux conditions météorologiques
Bonne résolution	Interférences avec les rayons du soleil
Coût accessible	Sensibilité aux conditions météorologiques

### 1.2.2.4 Détecteurs RADAR (RADio Detection And Ranging)

Le radar est né de l'observation du physicien allemand Hertz en 1887 sur la réflexion des ondes électromagnétiques et lumineuses sur les objets, lorsque ces ondes étaient concentrées en faisceaux au moyen d'un réflecteur. Mais la notion même de 'RADAR' apparaîtra aux Etats-Unis. Les premiers systèmes radar sont nés en 1930 aux Etats-Unis et en Grande Bretagne, et reposaient sur des sources VHF (Very High Frequency). La mise au point du magnétron en 1940 par les Britanniques ouvrit la voie à des radars plus compacts avec des antennes à fort gain faisant de cette technologie un élément déterminant au cours de la seconde guerre mondiale.

Un radar est un capteur qui illumine une portion d'espace avec une onde électromagnétique et qui reçoit en retour les ondes réfléchies par les cibles présentes dans l'espace illuminé. Le fonctionnement du radar est essentiellement fondé sur le principe de l'écho et les propriétés des ondes radio qui se déplacent dans le vide à la vitesse de la lumière soit environ 300.000 km/s. La portée est tributaire essentiellement de l'antenne utilisée à la fois à l'émission et à la réception, de la puissance d'émission et de la nature de l'objet éclairé (à travers la Surface Equivalente Radar (SER) de celui-ci). Il s'agit de diffuser au moyen d'une antenne un faisceau d'ondes électromagnétiques concentrées dans une direction souhaitée. Lorsque ces ondes rencontrent un objet, elles se réfléchissent dessus (tout ou partie) en formant un "écho radar" qui revient vers le radar et est capté par l'antenne de réception. Le signal ainsi obtenu est amplifié et traité pour en extraire des informations diverses dont la détection de présence d'une cible particulière.

Les signaux émis par un radar subissent l'influence de l'environnement dans lequel ils se propagent (réflexion, diffraction, absorption...); cela se traduit in fine par une puissance à la réception dont il faut pouvoir évaluer la valeur. Ceci est possible grâce à l'équation radar.

L'équation radar est le bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise. La puissance reçue par l'antenne de réception d'un radar s'exprime par [5] :

$$P_r = P_e \frac{G_e G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_e^2 R_r^2 L_E L_R} \quad (1.2)$$

où l'on a :

$P_r$  = Puissance reçue

$P_e$  = Puissance émise

$G_e$  = Gain de l'antenne émettrice

$G_r$  = Gain de l'antenne réceptrice

$\lambda$  = Longueur d'onde du radar

$\sigma$  = Section efficace radar de la cible

$R_e$  = Distance cible-radar émetteur

$R_r$  = Distance cible-radar récepteur

$L_E$  et  $L_R$  sont les pertes intervenant sur les circuits d'émission et de réception

Dans le cas où les antennes d'émission et de réception du radar sont confondues cette écriture se simplifie en :

$$P_r = P_e \frac{G_e^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_E L_R}$$

$R$  étant la distance du radar à la cible.

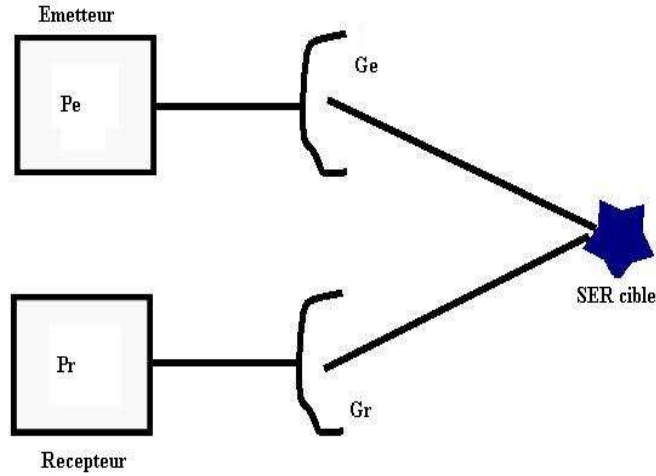


FIG. 1.2 – *détection de cible par radar bistatique*

La FIG.1.2 indique le principe de réflexion du signal radio employé pour une détection de cible par radar.

**Principe Global de la détection par radar [5]** Le signal reçu par le récepteur radar est la somme du signal "utile" en provenance du véhicule cible et du bruit qui s'y est superposé. Un filtrage au niveau du récepteur maximise le rapport signal à bruit (Signal Noise Ratio, SNR) indépendamment du niveau initial de bruit sur le signal d'intérêt (filtre adapté). Le rapport signal à bruit alors évalué est de :

$$SNR = \frac{E}{kT\Delta_F} \frac{G_e G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_E L_R} \quad (1.3)$$

avec la relation

$$E = \int_{T_e} P_T(t) dt \quad (1.4)$$

- $E$  représente l'énergie transmise. En pratique  $E$  se calcule en multipliant la puissance moyenne par la durée de transmission  $T_e$ .
- $k$  désigne la constante de Boltzman  $k = 1.38.10^{-23} J/K$
- $T$  est la température équivalente de bruit du récepteur exprimée en degrés Kelvin
- $\Delta_F$  est la bande de fréquence.

Une fois le rapport SNR évalué, on a deux hypothèses possibles :

- Hypothèse  $H_0$  - il n'y a pas de cible. On considère alors que le signal reçu est du bruit pur.

- Hypothèse  $H_1$  - il y a une cible. Dans ce cas on considère que le signal reçu est la somme du signal utile et du bruit.

La détection consiste donc à analyser le signal reçu et à en déduire la présence ou non d'une cible potentielle. Pour évaluer l'efficacité du système radar on est alors amené à étudier deux probabilités conditionnelles à savoir :

- La probabilité de détection vraie PDV qui est la probabilité qu'un obstacle soit correctement détecté dans les conditions de l'hypothèse  $H_1$
- La probabilité de fausse alarme PFA qui est la probabilité que la présence d'un obstacle soit indiquée sous l'hypothèse  $H_0$

Ces probabilités permettent de fixer un seuil de détection pour décider de la présence ou de l'absence de cible dans l'environnement d'intérêt.

**Importance de la surface équivalente radar** La Surface Equivalente Radar (SER) apparaît dans l'équation radar comme une donnée essentielle à laquelle il faut avoir accès. La SER d'un objet est la propriété qui indique l'importance relative de la surface de réflexion d'un faisceau électromagnétique sur cet objet. Il existe très peu de données de mesure dans la littérature sur la distribution de SER. Au vu de l'application qui nous intéresse ici, celle d'extraire des informations sur la dynamique des véhicules détectés, il est important de disposer d'une distribution spatiale de la SER des véhicules. D'autre part, cette grandeur étant très sujette à l'angle d'incidence du faisceau électromagnétique, il importe de pouvoir l'évaluer pour différents angles.

Dans [6], Naoyuiki Yamada présente un système de mesure de SER-3D à haute résolution. Les résultats obtenus pour quelques valeurs angulaires, à 76 GHz sur un véhicule de type berline, sont présentés. Ces mesures effectuées par un dispositif placé à 7 m du véhicule montrent qu'à incidence nulle, la valeur de la SER est maximale dans les environs du milieu de la banquette arrière où elle atteint +5.6 dBsm. Il ressort de ce document également que la valeur maximale de la SER décroît à mesure que l'angle d'incidence augmente, cette valeur maximale de SER étant obtenue dans des zones de plus en plus rapprochées des bords du véhicule.

Mende et al expliquent dans [7], la complexité de la nature de la SER d'un véhicule. Du point de vue de la SER, le véhicule y est perçu comme un ensemble de points de rétro-diffusion de l'onde électromagnétique. La SER est démontrée fluctuante sur les véhicules automobiles en mouvement.

Naoyuiki Yamada démontre dans [8] que la valeur de la SER varie fortement, même sur des piétons et qu'elle dépend également de la nature de la tenue vestimentaire. Ces résultats, établis à 76 GHz, illustrent à la fois la difficulté qu'il y a à établir des valeurs SER de référence et en même temps l'urgence de disposer du plus grand nombre possible de résultats de mesures de SER.

**Architecture des systèmes radar** L'extraction des données d'un signal radar est possible grâce à une multitude de techniques dont nous exposons les principes dans les paragraphes qui suivent.

Nous avons vu précédemment par quel principe un système radar est à même d'indiquer l'absence ou la présence d'une cible dans une zone de l'espace. Un radar est capable de renseigner davantage sur une cible illuminée. En effet si l'antenne du radar possède un lobe principal très étroit, son orientation permet de disposer de la position angulaire de l'obstacle. La distance à celle-ci étant accessible grâce au temps mis par le signal pour effectuer le trajet aller-retour du radar à la cible. En effet, la vitesse de propagation de l'onde radar étant connue, la connaissance du temps de ce parcours équivaut à la connaissance de la distance radar-cible. De plus si la cible est en mouvement, sa vitesse relative par rapport au radar est proportionnelle à la fréquence Doppler du signal retour.

**Détection par radar pulsé [9]** Il existe une grande variété de techniques de détection radar, dont la détection par impulsions. Le radar pulsé permet de déterminer la distance  $d$  d'une cible en mesurant le temps  $t$  de trajet aller-retour d'une onde micro-onde pulsée :

$$d = \frac{ct}{2}$$

où  $c$  désigne la célérité de la lumière et vaut  $c = 2.998.10^8 m/s$ .

Il est parfois nécessaire de pouvoir distinguer les cibles fixes des cibles mobiles notamment dans les applications liées à l'automobile comme c'est le but ici. La technique utilisant l'effet Doppler permet de déterminer la vitesse des cibles non stationnaires, ce qui est une donnée fondamentale pour une régulation de vitesse. Si  $f_0$  désigne la fréquence du signal émis par le radar,  $f_d$  la fréquence Doppler et  $v$  la vitesse radiale relative de la cible on a la relation suivante :

$$f_d = \frac{2vf_0}{c}$$

En réception la fréquence est alors  $f_0 \pm f_d$  où le signe "+" signifie une cible se rapprochant et le signe "-" une cible qui s'éloigne.

La FIG.1.3 indique le principe de calcul de la distance radar-cible.

Les radars pulsés sont les plus connus et les plus utilisés, toutefois ils semblent moins appropriés pour les applications automobiles pour différentes raisons :

- la distance la plus courte mesurable est déterminée par la durée de l'impulsion et les temps de commutation qui sont tous très petits dans le cas du trafic routier et sont donc difficiles à réaliser.
- pour accéder à la vitesse par effet Doppler il faut utiliser des systèmes cohérents qui sont très coûteux lorsqu'ils doivent pouvoir générer des impulsions ultracourtes.



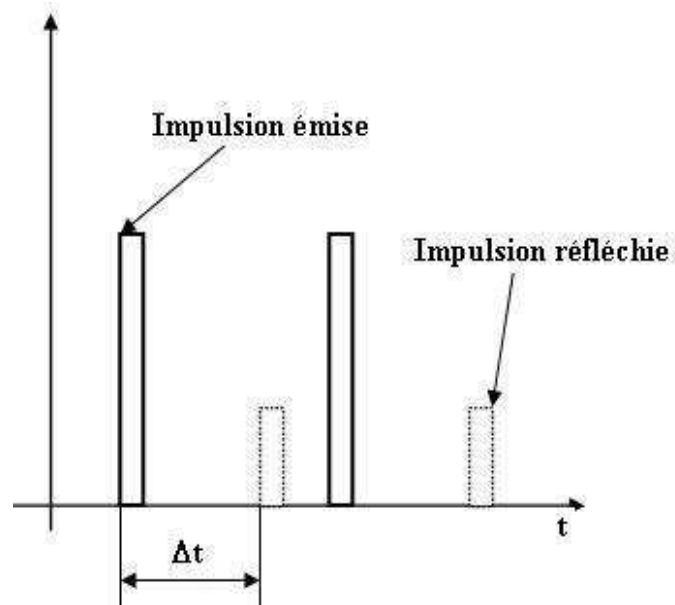


FIG. 1.3 – *Visualisation des impulsions émises et reçues pour l'évaluation de la distance radar-cible*

**Radar à onde continue (continuous wave radar) [9]** Ce type de détection repose sur une émission continue. L'évaluation de la différence de fréquence entre le signal émis et le signal reçu permet d'accéder à la valeur de la vitesse relative grâce à la relation liant la vitesse à l'effet Doppler. Une petite portion du signal émis est envoyée vers le récepteur comme signal de référence. Ce signal sera comparé au signal écho lors de la réception. Ainsi, si la cible est en mouvement, sa vitesse relative se traduit par une translation en fréquence et on reçoit  $f_0 + f_b$  avec :

$$f_b = 2f_0 \frac{v_r}{c} \quad (1.5)$$

désignant la fréquence de battement.

Ce radar émet à une seule fréquence à la fois, a une bande de fréquence nécessaire en fréquence intermédiaire (FI) minimale et évalue sur une gamme de distance et de fréquence bien plus importante qu'un radar pulsé. D'autre part, l'énergie moyenne émise par un radar CW est quasi constante et la fréquence d'émission employée peut être très diversifiée.

La limite de ce radar repose sur son incapacité à déterminer la distance de la cible. Afin de permettre cela il est souvent associé à une technique de modulation en fréquence, d'où le radar FM-CW.

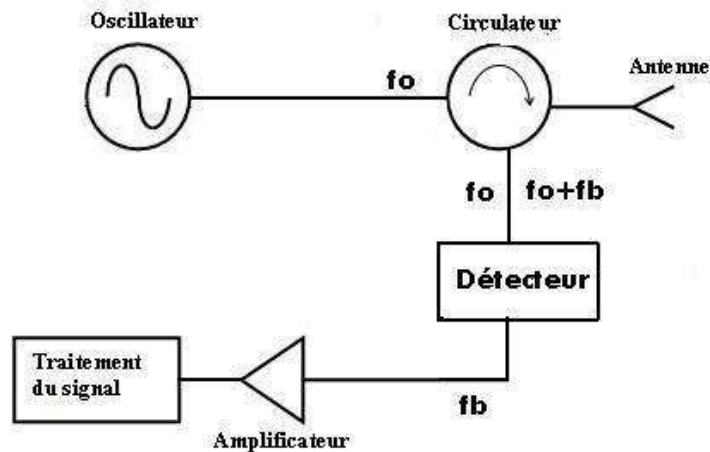


FIG. 1.4 – *Architecture d'un radar CW*

**Radar Frequency Modulated Continuous Wave (FM-CW) [9]** : C'est le radar CW auquel on a apporté une modulation de la fréquence à l'émission. Les modulations les plus couramment rencontrées sont les modulations de fréquence triangulaires. La distance est évaluée par la relation :

$$R = \frac{T}{f_m} \cdot \frac{c}{2} \cdot f_b, \quad (1.6)$$

où  $T$  et  $f_m$  sont comme indiqués sur la FIG.1.5 et où  $f_b$  désigne la fréquence de battement qui correspond à la variation de la fréquence de retour pour un obstacle fixe.

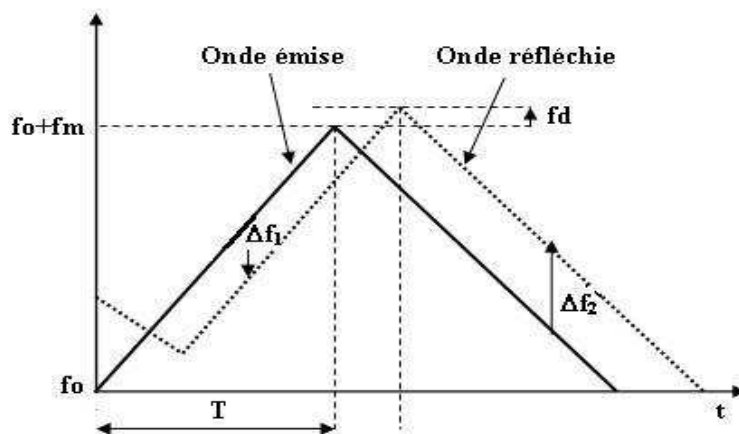


FIG. 1.5 – *Modulation FM associée à une émission CW*

Le radar FM-CW a la capacité de distinguer deux cibles proches pourvu que celles-ci soient à une certaine distance l'une de l'autre. Cette distance correspond à la résolution en distance du système FM-CW et se mesure de la manière suivante :

$$\Delta R = \frac{c}{2f_m} \quad (1.7)$$

La synoptique d'un radar FM-CW est présentée sur la FIG.1.6. On y remarque notamment la présence du modulateur placé avant l'oscillateur. Le rôle du circulateur consiste à assurer l'isolement mutuel entre les voies d'émission et de réception du signal. Le mélangeur permet l'extraction de la fréquence de battement de laquelle on extrait après amplification et traitements les informations de position et de vitesse relative de la cible dans le cas d'une détection positive.

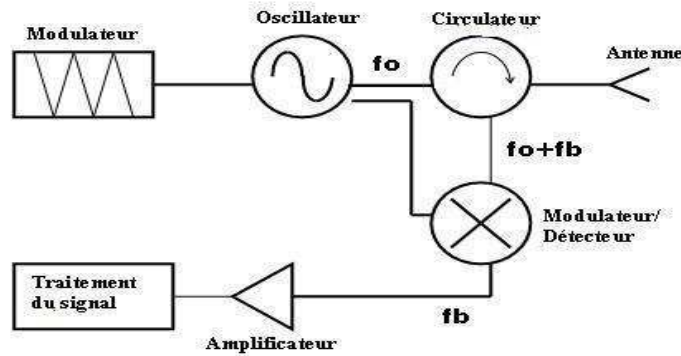


FIG. 1.6 – *Synoptique d'un radar FM-CW*

**Radar MTI (Moving Target Indicator) [9] :** Le but de ce radar est d'appliquer une discrimination sur les échos en provenance de cibles fixes (immeubles, arbres,...) et mouvantes (avion par exemple). Plus concrètement, il s'agit de rejeter les échos des cibles fixes au profit de ceux de cibles non stationnaires. Le MTI cohérent repose sur la variation de phase enregistrée sur l'écho des cibles en mouvement pour les distinguer des obstacles fixes. En effet lorsqu'une cible est fixe, le temps de parcours aller-retour enregistré sur un signal émis sur cette cible est invariante entre les émissions de pulses : la phase de l'écho est donc constante. Par contre lorsque la cible est mobile le temps de parcours se réduit si elle approche et augmente dans le cas contraire, ce qui induit indubitablement une variation de la phase sur les échos successifs reçus comme cela apparaît clairement sur la FIG.1.7.

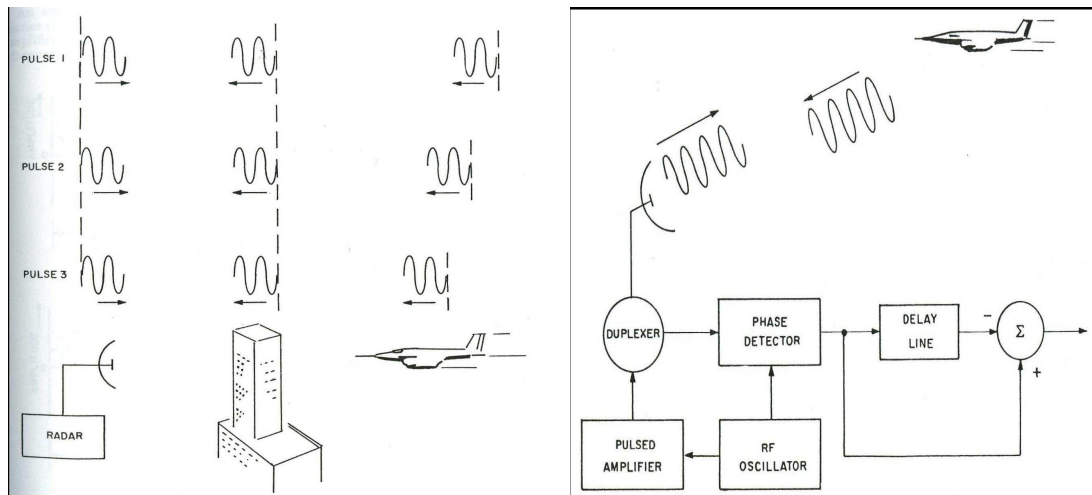


FIG. 1.7 – *Détection d'obstacles mouvants par radar MTI [10]*

**Radar automobile d'aide à la conduite :** Les dommages divers liés aux accidents de la route ont motivé les constructeurs et équipementiers automobiles depuis des années déjà, à fournir aux conducteurs de véhicules automobiles une assistance technique qui allège leur tâche dans l'opération de conduite. On compte au nombre de ces systèmes d'aide à la conduite les radars ACC (Autonomous Cruise Control) dont le principe est illustré sur la FIG.1.8.



FIG. 1.8 – *Principe d'un radar ACC [11]*

L'installation de ces systèmes dans les années 1992 sur une flotte de 1500 bus de la compagnie Greyhound en Amérique du Nord a fait baisser le nombre d'accidents de 25% sur 400 millions de kilomètres parcourus [12]. Toutes les technologies de détection vues dans la section précédente peuvent être employées dans l'architecture du module de détection de ces systèmes ACC.

On distingue le radar longue portée LRR (Long Range Radar) et le radar courte portée SRR (Short Range Radar). A la longue portée est destinée la bande de fréquence

76-77 GHz. D'une portée généralement au delà de 200 m, ce radar est opérationnel pour des vitesses de cibles comprises entre 30 et 180 km/h. Le radar courte portée ou SRR fonctionne sur la bande 24 GHz. Selon une décision de ECC (Electronic Communications Committee), cette bande de fréquence reste disponible pour les applications SRR jusqu'au 1<sup>er</sup> juillet 2013, date à partir de laquelle la bande 79 GHz sera obligatoire [13]. Ce radar est multitâche, il assure la gestion automatique de l'arrêt et du redémarrage du véhicule lorsque cela est nécessaire (fonctionnalité **Stop and Go**), intervient dans les changements de file, dans le stationnement dans un parking.

Les recherches actuelles anticipent l'entrée en vigueur de ces nouvelles réglementations. De nombreux résultats sont déjà disponibles pour les applications automobiles aussi bien dans la bande de 76-77 GHz que dans celle de 24 GHz. A ce propos, Meinecke et al [14] présentent un système préventif de collision latérale reposant sur un système radar de type CW à 24 GHz conforme aux régulations ETSI (European Telecommunications Standards Institute) entre autres. A la vue de l'application concernée, le diagramme de l'antenne de ce système a été conçu pour couvrir les zones angulaires typiques concernées dans les scénarios de collision latérale. Le diagramme de l'antenne est présenté sur la FIG.1.9. Ce radar latéral est capable de détecter différents types d'objets comme les voitures, les camionnettes, les camions etc. avec une forte probabilité de détection. Cette détection sert de base pour une estimation de trajectoires des véhicules obstacles ainsi que des risques éventuels dus à la nature de ces trajectoires.

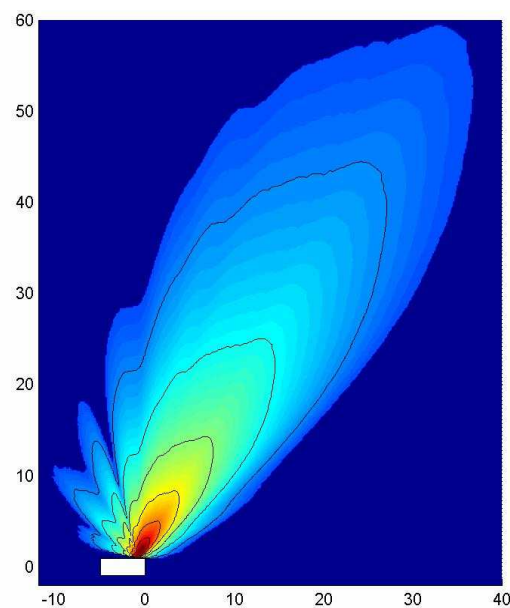


FIG. 1.9 – *Diagramme de l'antenne à 24 GHz [14]*

Gresham et al [15] présentent un système radar Doppler-pulsé pour une application ACC dans la bande 76-77 GHz. L'architecture de ce système est présentée sur les FIG.1.10 et FIG.1.11. Ce radar est formé par un oscillateur résonateur diélectrique fonctionnant (DRO) à 19 GHz, un amplificateur et un multiplieur de fréquence par deux qui fait passer la fréquence initiale de 19 GHz à 38 GHz. Ce signal à 38 GHz est également amplifié et multiplié par deux en fréquence pour générer un signal à 76 GHz. A l'émission, un commutateur à diode pin permet d'orienter le signal vers l'une des trois antennes

d'émission. A la réception, le DRO est ajusté en fréquence afin d'obtenir une fréquence intermédiaire (FI) appropriée et le signal de fréquence 76 GHz+ FI est positionné sur l'oscillateur local. Le signal ainsi récupéré est mixé avec l'oscillateur local pour générer le signal de fréquence intermédiaire qui sert de base pour le traitement.

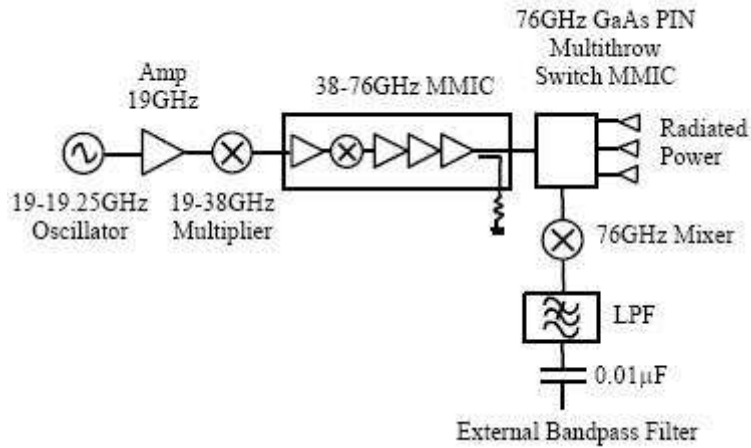


FIG. 1.10 – *Architecture radar ACC Doppler-pulsé [15]*

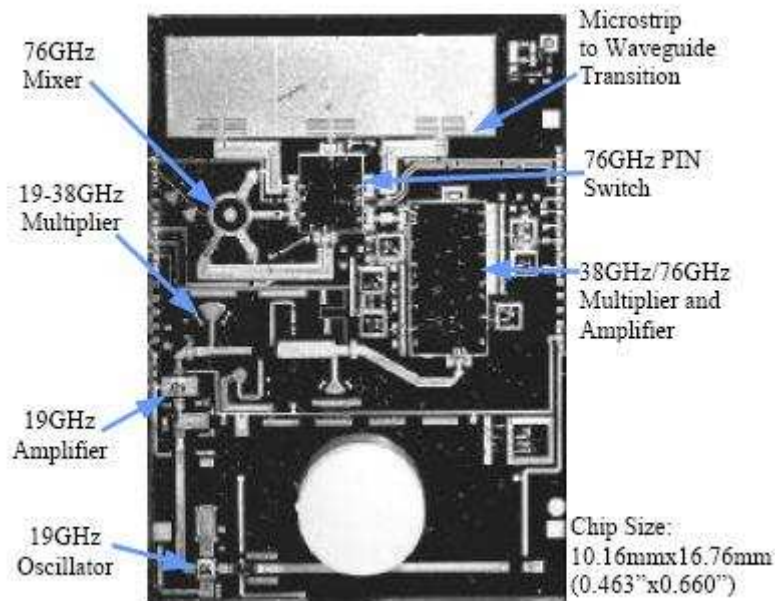


FIG. 1.11 – *Module radar ACC Doppler-pulsé [15]*

TAB. 1.5 – Performances de la détection par radar

Points forts	Points faibles
Longue portée	pollution électromagnétique
Robustesse face aux conditions météorologiques	Coût relativement élevé
Bonne performance de détection	Interférence électromagnétique
	Encombrement

Nous avons vu qu’il existait de nombreuses techniques de détection de cibles et d’extractions des informations de distance et de vitesse relatives sur ces cibles. Une autre donnée importante serait de pouvoir associer à ces cibles une position angulaire, ce qui permettrait une localisation plus fine des cibles dans l’espace d’intérêt. Il existe à cet effet différentes approches qui sont présentées dans la section suivante.

### 1.2.3 Systèmes de mesure de la position angulaire

Un faisceau de radar immobile est tout à fait insuffisant pour détecter et situer précisément des obstacles potentiels. En effet, il servirait seulement à détecter des véhicules en ligne droite et même peut-être seulement dans la même voie de circulation selon les caractéristiques du faisceau. En situation réelle, un véhicule suit la courbure de la chaussée et le besoin de localiser au plus tôt d’éventuels obstacles demeure également important dans ces conditions. C’est pourquoi, il convient que le radar puisse disposer d’un faisceau mobile afin d’assurer une couverture suffisante de la chaussée sur une distance raisonnable. De plus, un dépointage de faisceau permet de localiser plus précisément la position de l’obstacle. Aussi nous intéressons-nous ici aux différentes techniques de dépointage de faisceau pour la détection de cibles.

#### 1.2.3.1 Balayage mécanique de faisceau [9]

Dans ce type de balayage, on dispose d’un axe autour duquel on fait pivoter l’antenne de façon continue, de manière à couvrir une zone spécifique de l’horizon de conduite. Le problème majeur rencontré avec ce système est sa sensibilité aux vibrations. D’autre part, le balayage devant se faire à vitesse élevée (durée de balayage de 100 ms typiquement), la motorisation du système demeure compliquée, ce qui rendrait une production de masse très coûteuse.

#### 1.2.3.2 Balayage par commutation [9]

Le balayage par commutation consiste à commuter entre différentes antennes sources, chacune de ces antennes sources visant à illuminer une direction bien précise. On associe généralement ces sources à des systèmes focalisants pour améliorer les performances de l’ensemble et en améliorer le rendement. Cette méthode est bien adaptée au système radar automobile car elle favorise une large couverture et permet d’associer sur une même structure de la courte portée et de la longue portée. Dans cette configuration la longue portée est gérée par une source centrale pour la vision en avant et la courte portée par

des sources latérales pour une vision sur les côtés. Il convient dans ce type de système de bien choisir le nombre de sources ainsi que la vitesse de commutation. En effet plus il y a de sources et plus l'architecture se complexifie. Quant à la vitesse de commutation, elle se doit d'être élevée pour éviter les problèmes de décrochage de la cible.

### 1.2.3.3 Balayage par système monopulse [19]

Il s'agit d'analyser des faisceaux sur deux ou trois voies. Ces faisceaux forment un réseau d'antennes en émission. En réception on compare les phases ou les amplitudes des signaux reçus sur les différentes voies pour en déduire la position angulaire de la cible. Il existe donc deux types de balayage par système monopulse :

**-Le monopulse d'amplitude :** Cette technique consiste à alimenter deux sources en phase généralement associées à un système focalisant et disposées de manière symétrique par rapport au foyer de ce système focalisant. Ces sources produisent des faisceaux symétriques faisant entre eux un angle  $\theta$  égal à leur ouverture à -3 dB. Les deux sources étant alimentées en phase, leurs diagrammes de rayonnement se combinent pour former un faisceau unique dont l'énergie est concentrée dans l'axe. Ainsi toute réflexion sur une cible en dehors de l'axe renvoie sur les deux voies de réception des signaux S1 et S2 d'amplitudes différentes. On a, pour une position angulaire  $\theta_0$  vérifiant  $\theta_0 < \theta/2$ , la relation :

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{S1 - S2}{S1 + S2} = k \frac{\theta}{\theta_0} \quad (1.8)$$

Où  $\Sigma$  est la voie somme et  $\Delta$  la voie différence et  $k < 1$ . Cette relation permet de disposer de la position angulaire d'une cible en dehors de l'axe. La FIG.1.12 donne une illustration de ce système.



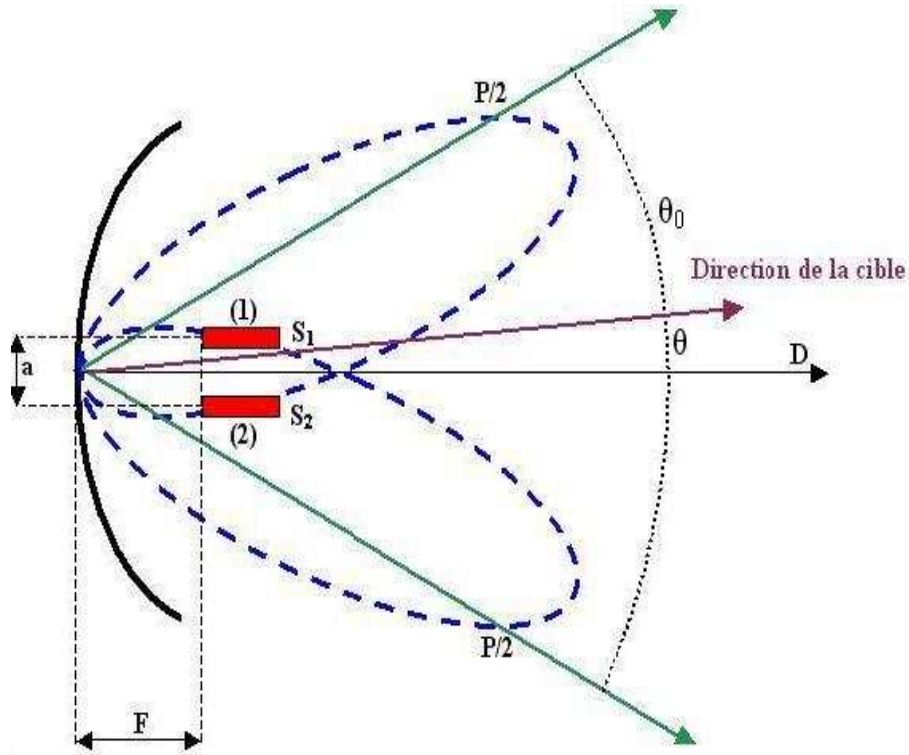


FIG. 1.12 – *Système monopulse d'amplitude [9]*

-**Le monopulse de phase** : La méthode monopulse de phase utilise un interféromètre à deux antennes. Le système radar emploie des sources présentant des faisceaux parallèles. Les antennes reçoivent des signaux d'amplitudes identiques mais déphasés. La valeur du déphasage est donnée par la relation suivante :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda}$$

Le monopulse de phase a l'avantage de nécessiter seulement deux sources tandis que le monopulse d'amplitude peut en nécessiter un grand nombre. Par contre si le faisceau des antennes est étroit, afin d'assurer le recouvrement des diagrammes la distance  $d$  va être faible et donc le champ de vision de ce système est plus petit que celui du monopulse d'amplitude.

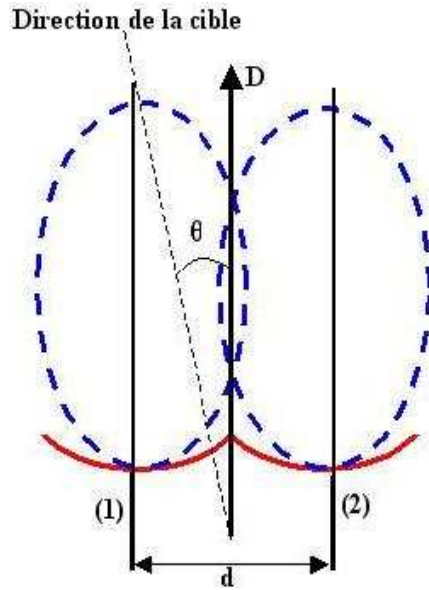


FIG. 1.13 – *Système monopulse de phase [9]*

#### 1.2.3.4 Balayage électronique

Ce type de balayage repose essentiellement sur la variation de phase ou de fréquence d'un réseau d'antennes sources. La position angulaire de la cible est déterminée en exploitant ces changements de phase ou de fréquence [9]. Dans le balayage électronique de phase, la variation de la phase au niveau des éléments rayonnants peut être continue ou discontinue. Dans le premier cas, les sources sont alimentées par un déphaseur analogique et dans le second l'alimentation des éléments rayonnants se fait au moyen d'une matrice de Butler [20] constituée de coupleurs. Le balayage électronique de fréquence consiste à alimenter les sources en série par l'intermédiaire d'une ligne de grande longueur. La longueur d'onde électrique  $\Delta l$  de la ligne entre deux sources ainsi que la longueur d'onde guidée  $\lambda_g$  définissent alors le déphasage  $\Delta\Phi$  entre les sources selon la relation  $\Delta\Phi = 2\pi\Delta l/\lambda_g$ . En variant alors la fréquence, on fait varier la longueur d'onde guidée  $\lambda_g$  ce qui fait varier à son tour la position du faisceau [21].

La FIG.1.14 indique le principe de ce type de balayage.

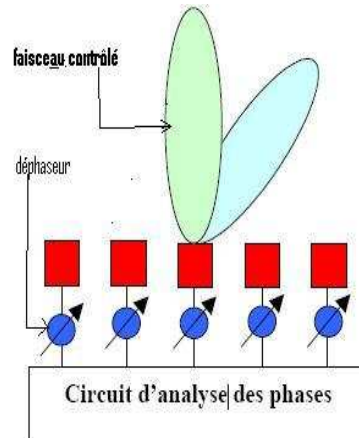


FIG. 1.14 – *Principe du balayage électronique [9]*

Quel que soit le capteur de perception physique utilisé pour caractériser l'environnement du véhicule, les informations qu'il fournit sont initialement brutes et de bas niveau. Or pourrait-il y avoir un quelconque intérêt à disposer d'informations dont on ne sait quoi en dire ? L'autonomie d'un système nécessite une capacité d'interprétation des données sur l'environnement perçu. Aussi, ces systèmes de détection sont-ils secondés par des capteurs logiques de traitement des informations.

### 1.3 Interprétation des données issues de la perception

Les données issues des capteurs de détection sont certes nombreuses, mais elles ont un contenu informationnel pauvre qu'il est nécessaire d'enrichir et d'organiser. Les capteurs logiques élaborent à partir de ces données des informations de haut niveau directement utiles dans l'accomplissement précis des tâches d'autonomie. En effet, ces traitements visent à la reconstruction des environnements statique (infrastructure routière) et dynamique (autres véhicules dans le trafic) du trafic, mais les signaux qui leur sont fournis doivent être préalablement améliorés. Il existe plusieurs techniques pour les épurer du bruit. Les techniques de filtrage permettent d'améliorer la qualité du signal d'information. Elles consistent généralement en la minimisation du bruit. Les filtres adaptés sont souvent employés à cette fin mais induisent une contrainte sur la connaissance a priori du type de bruit qui affecte le signal d'information. Lorsque le signal est une image, le filtrage peut reposer sur un critère objectif ou subjectif selon que l'on cherche une forme donnée dans l'image ou que l'on vise à ce que celle-ci soit lue par l'œil humain.

La connaissance de l'environnement dynamique du véhicule passe par l'évaluation de grandeurs dynamiques des usagers du trafic : leur position en distance, leur position angulaire, leur vitesse, leur accélération. Les techniques employées reposent souvent sur des modèles de comportements dynamiques ou cinématiques de véhicules.

Pour caractériser l'infrastructure routière, la technique la plus utilisée repose sur la segmentation d'images basées sur la détection de contour, ou sur l'homogénéité de la région. Cela peut supposer la reconnaissance des lignes blanches ou du rebord de la

chaussée. Cette reconnaissance est souvent poussée jusqu'à l'identification des marquages spéciaux tels que les flèches de rabattement ou de sélection, la nature continue ou discontinue de la ligne, les passages piétonniers. Pour ce faire, une base de données intègre des images prédéfinies de ces signaux horizontaux que l'on peut comparer pour identification aux images en provenance des caméras de perception.

Le but final de la perception étant de disposer d'informations sur la dynamique des obstacles et sur l'infrastructure, des études plus récentes investissent sur une coopération directe entre véhicules d'un même trafic et entre véhicules et infrastructure. Des protocoles de communication tirent les richesses d'une télématique très évolutive. Chaque véhicule envoie directement aux usagers qui le suivent les renseignements sur sa position, sa vitesse, etc. et reçoit de l'infrastructure les données utiles pour une régulation optimisée. Il ne s'agit plus simplement de régler la dynamique d'un véhicule donné par rapport à celui qui le précède immédiatement, mais de gérer de manière cohérente et optimale, un ensemble de véhicules du trafic routier.

Sans doute avons-nous compris que l'importance de l'acquisition de telles données par les véhicules autonomes vient du support que constitue celles-ci pour une décision active ou réactive. En effet, si un système, pour être autonome, doit disposer d'informations qu'il est capable d'interpréter sur son environnement, c'est bien dans le but de s'en servir pour agir sur cet environnement ou réagir face à celui-ci. Mais est-il possible d'agir et/ou de réagir sans aucun moyen? La réponse à cette question est évidemment négative et nous nous proposons de présenter dans la suite des systèmes de contrôle de véhicules automobiles.

### 1.3.1 Les systèmes de contrôle intelligents

De nos jours, l'électronique embarquée révolutionne la conception de l'automobile. Les équipements électroniques comptent de 20% à 35% du coût de fabrication des véhicules haut de gamme : Contrôle de parties mécaniques du véhicule, mise à disposition d'informations utiles au bénéfice du conducteur, prise en main partielle ou même totale du véhicule sont autant de tâches qui leur sont assignées.

Il existe une grande variété de systèmes de contrôle pour automobiles. On peut les classer en plusieurs groupes suivant l'origine des signaux informatifs sur la base desquels ils interviennent. On distingue ainsi :

- Les technologies basées sur les capteurs proprioceptifs qui renseignent sur l'état propre du véhicule contrôlé. Dans ce cas l'intervention du système ne repose sur aucune information extérieure au véhicule. Certains de ces systèmes viennent en renfort à une intervention du conducteur. Fait parti de ces outils, le système **ABS** (Anti Block System) qui utilise les capteurs de vitesse des roues pour repérer un éventuel problème de blocage de roue lors d'un processus de freinage d'urgence. Le cas échéant, des soupapes hydrauliques limitent ou réduisent le freinage sur la roue concernée pour empêcher tout dérapage et assurer le maintien du contrôle de la direction. Ces technologies comprennent également les systèmes **ASR** (Anti Slip Regulation), technologie anti-patinage qui optimise la traction par intervention sur

les freins et le moteur ; les systèmes **4WS** (Four Wheel Steering), systèmes de direction agissant sur les quatre roues. D'autres systèmes sont complètement autonomes et ne sont pas activés par une intervention du conducteur. Comme illustration, on peut citer les systèmes **DSC** (Dynamic Stability Control) qui commandent la suspension du véhicule, les systèmes **ESP** (Electronic Stability Program) qui aident au maintien de la trajectoire et corrigent les moindres tendances au dérapage.

- Les technologies utilisant les données sur l'environnement à partir de sources installées dans le véhicule contrôlé : Les systèmes **ACC** (Adaptive Cruise Control) qui commandent la dynamique et équipent déjà certains véhicules sur le marché font partie de ce groupe. De nombreuses études en cours visent à élargir le domaine d'application des systèmes ACC aux applications Stop&Go qui permettraient l'arrêt et le redémarrage automatique du véhicule dans les conditions de trafic ralenti [22, 23] et facilitent ainsi la tâche du conducteur en situation de congestion routière [23]. On peut également citer à ce niveau les systèmes de contrôle latéral (Heading Control) qui gouvernent le tangage. Tous ces systèmes bien qu'autonomes gardent le conducteur dans la boucle de contrôle. Les systèmes de commande d'inter-distance, de prévention de collision, de prévention de sortie de route qui agissent eux aussi sur la base des informations sur l'environnement excluent, quant à eux, le conducteur de la boucle de contrôle.
- Les technologies qui en plus d'utiliser les données sur l'environnement en provenance de capteurs embarqués, en acceptent également depuis des sources extérieures. On peut citer à titre d'exemple les systèmes de commande du trafic utilisant le GPS (Global Positioning System) et le GSM (Global System for Mobile Communications), la commande de vitesse par exploitation de données GPS, les systèmes de navigation.

Les technologies de sécurité routière sont développées en fonction du type d'environnement dans lequel elles sont appelées à intervenir. On distingue en effet deux types d'environnements selon l'interaction entre le véhicule équipé d'un système de contrôle, les véhicules environnants et l'infrastructure routière. A ce propos, on considère qu'un environnement est non coopératif, lorsque le véhicule équipé d'un système de contrôle ne peut disposer d'informations sur le milieu que par ses propres moyens. C'est le cas des systèmes ACC généralement basés sur les technologies de perception par radar. Dans ce genre d'environnement, la réaction du véhicule contrôlé dépend essentiellement du comportement du véhicule qui le précède immédiatement. Au contraire, lorsque le véhicule commandé échange des informations sur le trafic avec d'autres usagers et/ou l'infrastructure routière, on dit que l'environnement de conduite est coopératif.

De nombreuses recherches ont lieu actuellement dans le cadre de la commande des véhicules en environnement coopératif. Le but est d'aboutir à une régulation concertée avec les autres usagers sur la base d'un volume important d'informations sur l'état du trafic et ses tendances. Cette approche repose essentiellement sur l'utilisation de systèmes de télécommunication sans fil [24]. Dans ce contexte des télécommunications en milieu automobile, Heddebaut et al [25] caractérisent la propagation des ondes électromagnétiques

en évaluant expérimentalement les paramètres de transmission et de rétrodiffusion à l'intérieur de véhicules dans la bande de fréquence 700 MHz-6 GHz. La FIG.1.15 illustre la communication inter-véhiculaire en environnement coopératif. Selon van Arem et al [26], la coopération intervéhiculaire, grâce aux systèmes de télécommunications sans fil, est un excellent moyen pour réduire de manière significative les inter-distances véhiculaires, avec les impacts positifs que représente cette réduction sur le trafic, notamment pour ce qui concerne la lutte contre la congestion routière. Des nouveaux protocoles de communications dédiés apparaissent de plus en plus. Yang et al proposent dans [27], un protocole adapté aux communications véhicule-véhicule (V2V). Ce protocole est conçu pour alerter sur les collisions afin d'améliorer la sécurité des passagers ; il définit des politiques de gestion des congestions routières par des messages d'alerte, élimine les messages d'alerte redondants tout en prenant en compte la coexistence d'un nombre important de véhicules en situation anormale. Le constructeur automobile américain General Motors (GM) a implémenté sur certains de ces véhicules la technologie V2V. Cette technologie apporte une réponse graduée aux dangers de la route [28]. La technologie prévient par exemple le conducteur qu'un véhicule est arrêté sur le bas-côté de la route, ou qu'une voiture située devant lui mais hors de son champ de vision (après un virage ou derrière un camion par exemple) vient d'effectuer un freinage d'urgence. De telles informations permettent au conducteur d'anticiper sur les manoeuvres à effectuer pour minimiser le risque d'accident. La transmission de l'information au conducteur se fait par des icônes visuels, des vibrations du siège entre autres. Si le conducteur venait à ne pas y répondre, le système conduit le véhicule dans une zone sûre et l'immobilise [29].

La communication véhicule-infrastructure (V2I) permet quant à elle, en plus de la rediffusion des informations reçues des véhicules du trafic vers l'ensemble des usagers du secteur concerné, la transmission d'informations aux conducteurs depuis des centres distants de contrôle routier, en temps-réel. Ces informations peuvent aussi bien concerner les conditions météorologiques que la position d'éventuels accidents de la route. Ces informations permettent aux conducteurs d'adapter leur plan de route de manière à éviter ces désagréments [30].



FIG. 1.15 – *Communications inter-véhiculaire en environnement coopératif [31]*

La FIG.1.16 illustre à la fois la communication véhicule-véhicule et la communication véhicule-infrastructure en environnement mixte. Le réseau routier ordinaire est complété par un réseau de télécommunications permettant la réception et la rediffusion des données en provenance des véhicules du trafic.

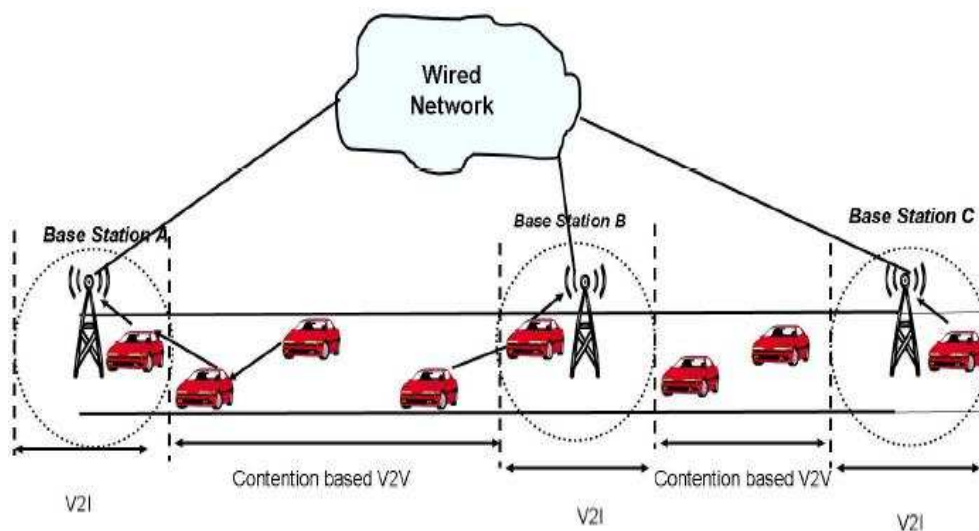


FIG. 1.16 – *Communications véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure [32]*

Un processus logique précède l'intervention des systèmes de contrôle depuis la détection d'événement par les capteurs. Ce processus peut être résumé comme indiqué sur la FIG.1.17

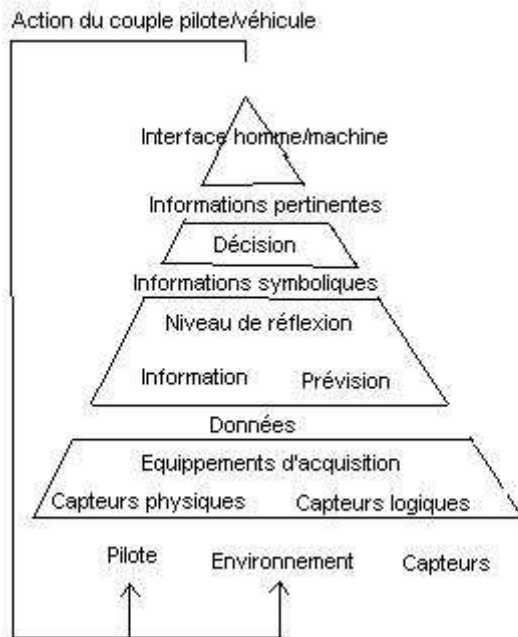


FIG. 1.17 – *processus général d'intervention de systèmes automatisés*

Comme le montre cette figure la masse de données issues des capteurs perd de plus en plus de son volume alors qu'elle est progressivement transformée en informations riches et monte vers les centres de décision et d'action. La perception par les capteurs recueille des données brutes sur le véhicule et sur le milieu environnant. Ces données sont alors transformées en informations symboliques par la tâche d'interprétation. Les informations symboliques sont à leur tour décodées pour fournir des renseignements pertinents dirigés vers le pilote et ou le système de contrôle (message d'alarme, suggestions de prise de contrôle automatique).

On attend donc d'un véhicule autonome qu'il soit capable d'entreprendre des actions en vue de la sécurité et du confort des passagers. Mais peut-il y avoir action convenable sans une stratégie de commande définie ?

### 1.3.2 Les politiques d'inter-distance de sécurité

Le but de cette partie est de présenter des méthodes de régulation d'inter-distance de sécurité qui ont alimenté la littérature scientifique [33] depuis plus d'un demi-siècle déjà. Certaines approches ne tiennent compte que du comportement spatio-temporel du conducteur sous l'influence de véhicules dans sa proximité immédiate : les modèles sur lesquels reposent ces politiques sont dits microscopiques [33]. D'autres approches sont basées sur la réaction du conducteur vis-à-vis des véhicules proches en faisant fi de la dimension spatio-temporelle : ces approches sont fondées sur des modèles mésoscopiques [33]. Enfin certaines méthodes prennent en compte le comportement des véhicules du trafic dans leur ensemble, les modèles qui en découlent sont dits macroscopiques [33]. Dans cette partie, nous nous limiterons aux politiques d'inter-distance microscopiques. Nous présenterons les politiques de sécurité reposant sur des modèles d'inter-distance



de sécurité, les politiques de contrôle basées sur stimulus, les politiques reposant sur la notion de psycho-espacement et enfin les politiques basées sur les techniques de réseaux de neurones et de logique floue.

### 1.3.2.1 Politiques basées sur des modèles de distance de sécurité

Ces modèles peuvent être utilisés dans le cadre d'un contrôle en boucle fermé et définissent alors l'interdistance de sécurité à partir de laquelle la dynamique du véhicule est commandée.

Ils décrivent le comportement dynamique d'un véhicule par rapport à l'usager qui le précède immédiatement. Pipes suggère à ce sujet une stratégie très simple : *"une bonne règle pour suivre un véhicule à une distance sûre consiste à laisser au moins la longueur d'une voiture entre vous et ce véhicule pour tous les dix miles par heure (16.1 km/h) de vitesse à laquelle vous circulez"* [34]. Si on note  $D_s$ , la distance de sécurité à observer, et  $L_f$  la longueur du véhicule qui précède, le modèle se formalise alors comme suit :

$$D_s = L_f \left(1 + \frac{v_f}{16.1}\right), \quad (1.9)$$

où  $v_f$  désigne la vitesse du véhicule suiveur exprimée en km/h.

Dans une telle approche, la distance de sécurité augmente linéairement avec la vitesse du véhicule suiveur et dépend théoriquement de la longueur du véhicule leader, ce qui constitue une limite importante de cette approche.

En 1988, il a été proposé dans [35] un modèle plus raffiné décrivant l'espace entre les véhicules d'un trafic contraint. Dans son modèle, le temps de réaction  $T$  est constitué des temps nécessaires à la perception, à la décision et au freinage, la distance de freinage étant considérée comme la distance nécessaire pour immobiliser le véhicule en prenant en compte le temps de réaction et la capacité de freinage maximale du véhicule. Cette capacité de freinage dépend à la fois du taux de friction entre les roues et le sol  $\mu$  et de l'accélération gravitationnelle  $g$ . Sa politique d'inter-distance se formalise de la manière suivante :

$$D_s(v_f) = L_f + Tv_f + v_f^2/(2\mu g) \quad (1.10)$$

où  $v_f$  désigne la vitesse du véhicule suiveur et  $L_f$  sa longueur.

En 1998, Jepsen [36] défend la position selon laquelle la distance de sécurité dépend de la longueur du véhicule suiveur. Il introduit un facteur de risque  $F$  lié à la vitesse du suiveur et introduit un nouveau modèle d'inter-distance de sécurité décrit par l'équation suivante :

$$D_s(v_f) = L_f + d_{min} + v_f(T + v_f F), \quad (1.11)$$

où  $d_{min}$  désigne la distance de sécurité minimale entre les véhicules à l'arrêt dans un trafic congestionné.

Le facteur de risque  $F$  lié à la vitesse est introduit pour tenir compte de l'attitude des conducteurs expérimentés à ne pas chercher à éviter simplement les collisions mais à minimiser en plus les dommages qui en résulteraient au cas où l'accident interviendrait. Cette politique considère que les conducteurs augmentent leur distance de sécurité d'un certain facteur (le facteur  $F$ ) proportionnellement à leur vitesse  $v_f$ .

On dispose également d'inter-distance de sécurité basée sur l'équation newtonienne du mouvement. Par exemple Braskstone et McDonald [37] proposent après manipulation de cette équation le modèle suivant :

$$D_s(t - \tau) = \alpha v_l^2(t - \tau) + \beta_2 v_f^2(t) + \beta_1 v_f(t) + \beta_0, \quad (1.12)$$

dans lequel  $\alpha$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  sont des constantes,  $v_f$  et  $v_l$  désignent dans cet ordre les vitesses des véhicules suiveur et leader,  $t$  désigne l'instant courant et  $\tau$  le temps de réaction.

Ce modèle est tributaire du comportement du véhicule leader.

Le modèle de Chien et Iannou [38] élimine le temps de réaction. En effet, l'utilisation de capteurs de perception performants permet une détection instantannée de l'obstacle. Le modèle se présente comme suit :

$$D_s = \lambda_1(v_f^2 - v_l^2) + \lambda_2 v_f + \lambda_3, \quad (1.13)$$

où  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  sont des constantes.

Plus récemment, Martinez et Canudas-de-wit (2005) [39] ont proposé un modèle d'inter-distance de sécurité convenable aussi bien pour les applications de régulation de vitesse adaptative (Adaptive Cruise Control) que pour les manoeuvres de démarrage-arrêt (Stop&Go). Le modèle de référence de cette politique d'inter-distance est basé sur des lois physiques de contact mécanique et permet de caractériser précisément l'ensemble des états initiaux pour lesquels les critères de sécurité sont assurés. L'inter-distance de sécurité s'écrit de la manière suivante :

$$D_s = d_{min} + \sqrt{\left(\frac{16}{27}\right) \frac{V_{max}^2}{B_{max}}}, \quad (1.14)$$

avec  $d_{min}$  correspondant à l'inter-distance minimale permise entre les véhicules à l'arrêt,  $V_{max}$  correspondant à la vitesse maximale du véhicule suiveur et  $B_{max}$  la capacité de freinage maximale de celui-ci.

Ce modèle est construit en supposant que le véhicule leader peut avoir un comportement imprévisible et même qu'il est capable de s'immobiliser avec un taux de freinage infini. Cette préoccupation fait que se confondent dans cette stratégie les notions généralement dissociées de distance de sécurité et de distance d'arrêt. Nous reviendrons plus en détail sur cette stratégie dans le chapitre suivant.

### 1.3.2.2 Politiques d'inter-distance basées sur Stimulus-réponse

Ces politiques reposent sur le principe suivant :

$$reponse = sensibilite * stimulus, \quad (1.15)$$

La réponse consistant en l'action de freinage ou d'accélération retardé par un temps de réaction global  $T$ .

Dans cette catégorie [40] propose le modèle suivant :

$$a_f(t + T) = \gamma(v_l(t) - v_f(t)), \quad (1.16)$$

où  $a_f(t)$  et  $v_f(t)$  désignent dans cet ordre l'accélération et la vitesse du véhicule suiveur à l'instant  $t$  et  $\gamma$ , la sensibilité du conducteur. Ici, le stimulus est défini par la différence de vitesse entre les véhicules leader et suiveur. Gazis et al proposent dans [41] l'expression suivante pour la sensibilité :

$$\gamma = c \frac{(v_f(t + T))^r}{\Delta x^s(t)} \quad (1.17)$$

où  $\Delta x$  représente l'espacement entre les véhicules,  $T$ , le temps de réaction, et  $r$  et  $s$  sont des constantes. L'accélération dans ce modèle s'écrit en fin de compte comme suit :

$$a_f(t + T) = c \frac{(v_f(t + T))^r}{\Delta x^s(t)} (v_l(t) - v_f(t)), \quad (1.18)$$

Ce modèle correspond peu à ce qui se passe dans une conduite réelle. En effet il considère que dans un trafic donné, lorsque l'inter-distance véhiculaire est très grande, les conducteurs réagissent à la différence de vitesse. Ainsi un véhicule lent qui en suit un rapide se verra entraîné également à une vitesse élevée car stimulé par la différence de vitesse. Par exemple un camion circulant à allure lente derrière une voiture rapide augmentera sa vitesse jusqu'à atteindre la vitesse de la voiture. Le trafic routier est considéré homogène, c'est-à-dire que tous les paramètres sont identiques pour tous les usagers et pour toutes les voies de circulation, ce qui constitue une hypothèse peu réaliste.

De nombreuses études ont essayé d'optimiser le choix des paramètres  $r$  et  $s$ . Dans cet objectif, les travaux d'Edie [42] établissent qu'il est judicieux de choisir  $r$  entre 0 et 2 dans les configurations de faible circulation. Mais une grande divergence des résultats sur le choix de ces paramètres limite l'utilisation de ces modèles [37].

Suivant une autre approche, Helly (1959) propose, quant à lui, d'adapter l'accélération du véhicule suiveur au comportement du véhicule leader :

$$a_f(t) = c_1 \Delta v(t - T) + c_2 (\Delta x(t - T) - D_{desire}), \quad (1.19)$$

avec  $\Delta v(t - T) = v_l(t - T) - v_f(t - T)$  correspondant à la vitesse relative entre les deux véhicules,  $c_1, c_2$  constantes et  $D_{desire}$  représentant la distance désirée exprimée sous la forme :

$$D_{desire}(t) = \alpha_1 + \alpha_2 v_f(t - T) + \alpha_3 a_f(t - T) \quad (1.20)$$

avec  $\alpha_1, \alpha_2$  et  $\alpha_3$  des constantes.

En 1995, Xing a proposé un modèle complexe inspiré à la fois du travail de Helly et de Gazis-Herman-Rothery constitué de quatre membres dont le premier concerne la conduite standard, le deuxième, l'accélération dans un trafic congestionné, le troisième pour l'effet du gradient et le dernier pour une conduite en régime de circulation libre.

$$a_f(t) = \alpha \frac{\Delta v(t - T)}{\Delta x^s(t - T)} + \beta \frac{\Delta x(t - T_2) - D_{desire}(v_f(t - T_2))}{\Delta x^s(t - T_2)} - \gamma \sin \theta + \lambda(v_{desire} - v_f) \quad (1.21)$$

$T$  et  $T_2$  sont des temps de réaction,  $D_{desire} = a_0 + a_1 v_f + a_2 v_f^2 + a_3 v_f^3$ .

### 1.3.2.3 Politiques d'inter-distance basées sur la notion de Psycho-espacement

Ces approches sont fondées sur les principes suivants :

- A grande inter-distance, le conducteur du véhicule suiveur est insensible aux différences de vitesse.
- A courte inter-distance, certaines combinaisons de la vitesse relative et de l'inter-distance n'entraînent pas de réaction chez le conducteur du véhicule suiveur, parce que la progression relative des deux véhicules est trop faible.

Wiedemann fut le premier à proposer un tel modèle [43]. Il y distinguait les conduites en mode contraint et mode non contraint sur la base de seuils de perception. L'idée première des politiques repose donc sur le fait qu'un conducteur s'aperçoit de son rapprochement progressif de l'utilisateur leader grâce aux changements apparents de la taille de celui-ci. L'angle visuel dont le conducteur est supposé se servir dans cette politique augmente à mesure qu'il s'approche du véhicule leader (FIG.1.18). Lorsque l'accélération du véhicule suiveur est proportionnelle à la variation de l'angle visuel, on obtient les résultats suivants :

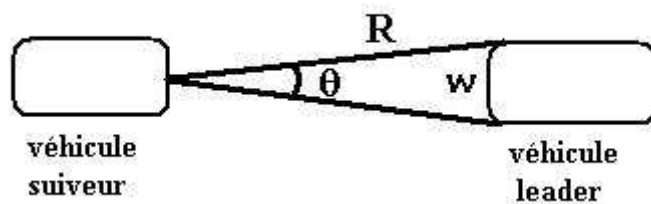


FIG. 1.18 – *Angle visuel et espacement vus par le conducteur*

$$a_f(t) = \beta \dot{\theta} \quad (1.22)$$

La largeur  $w$  du véhicule leader s'écrit comme suit :

$$w = 2R \sin(\theta/2) \simeq R\theta \quad (1.23)$$

où  $\theta$  est supposé être de petite valeur.

Comme  $w$  est constante, par dérivation, on obtient :

$$\dot{R}\theta + R\dot{\theta} \simeq 0 \quad (1.24)$$

d'où il vient que :

$$\frac{\theta}{\dot{\theta}} = -\frac{R}{\dot{R}} \quad (1.25)$$

L'accélération du véhicule suiveur s'écrit donc comme suit :

$$a_f(t) = -\mu \frac{\dot{R}}{R^2} = -\mu \frac{\Delta v}{(\Delta x)^2} \quad (1.26)$$

où  $\mu = \beta w$ , et où  $\Delta v$  et  $\Delta x$  désignent respectivement la vitesse relative et la distance relative. Le rapport  $\frac{\theta}{\dot{\theta}}$  est appelé le *Temps-à-impact*. Ce *Temps-à-impact* est comparé à un niveau de seuil pour informer le conducteur, le cas échéant, de la nécessité d'une manoeuvre de freinage. La principale difficulté avec ce modèle vient du fait que différents conducteurs préféreront différents niveaux de seuil [44].

#### 1.3.2.4 Politiques d'inter-distance utilisant les automates cellulaires

Des travaux récents ont introduit dans la théorie du trafic microscopique la notion d'automates cellulaires en anglais "Cellular Automaton" (CA). Les automates cellulaires décrivent le trafic comme un treillis de cellules de tailles égales (typiquement 7.5 m). Un automate cellulaire décrit de manière discrète les mouvements des véhicules de cellules en cellules [45, 46]. La taille des cellules est choisie de telle sorte qu'un véhicule circulant à la vitesse unité passe d'une cellule à la suivante durant un intervalle de temps unité. La vitesse des véhicules est une grandeur quantique dont les valeurs, en nombre fini, s'échelonnent entre 0 et une vitesse limite  $v_{max}$ . Le processus peut être divisé en trois étapes :

- *Accélération* : Tout véhicule ayant une vitesse inférieure à sa vitesse maximale  $v_{max}$  accélère pour atteindre la valeur quantique supérieure, c-à-d  $v \leftarrow \min(v_{max}, v + 1)$ .

- *décélération* : si la vitesse est inférieure à l'intervalle de distance  $d$  séparant du véhicule précédant, alors le véhicule décélère, c-à-d,  $v \leftarrow \min(v, d)$ .
- *phase de traîne* : Avec une certaine probabilité  $\rho_{max}$ , la vitesse d'un véhicule décroît spontanément :  $v \leftarrow \max(v - 1, 0)$ .

Cet ensemble minimal de règles de conduite et l'utilisation de machines massivement parallèles, rendent l'approche par automates cellulaires très rapide et utilisable pour des simulations de trafic à grande échelle sur réseaux autoroutiers. Ce modèle a évolué pour prendre en compte les scénarios multivoies de trafic routier [47].

La technique de poursuite classique utilisant les automates cellulaires est orientée espace et c'est une approche de nature heuristique. Wu et Brillon [48] ont proposé une autre approche utilisant des automates cellulaires orientés temps. Cette méthode décrit de manière plus réaliste le comportement des conducteurs.

Les automates cellulaires ont l'avantage de conserver les atouts des modèles complexes de micro-simulations tout en demeurant extrêmement performants en terme de temps de calcul. Ils manquent toutefois d'intuitivité et leurs mécanismes ne sont pas facilement interprétables dans la perspective d'une tâche de conduite.

### 1.3.2.5 Politiques d'inter-distance basées sur la logique floue et les réseaux de neurones

Il s'agit là d'une technique relativement récente que l'on peut considérer comme un modèle logique [49] et qui consiste à caractériser avec une approche mathématique le langage et le comportement humains. La théorie de la logique floue repose sur le concept de système d'inférence floue composé de trois éléments essentiels (cf FIG.1.19) :

- Une base de connaissances composée de règles de la forme *si prémisse alors conclusion* où la prémisse est une conjonction de prédicats du type " $x$  est  $A$ ",  $x$  étant une variable linguistique (vitesse, distance, température etc.) et  $A$  un sous-ensemble flou défini sur le domaine de variation de  $x$ , par exemple "la vitesse est élevée" ;
- un mécanisme d'interprétation permettant d'évaluer à quel degré telle observation précise d'une variable numérique appartient à tel sous-ensemble flou ;
- un moteur d'inférence, qui traite les informations nouvelles en fonction de la connaissance disponible.

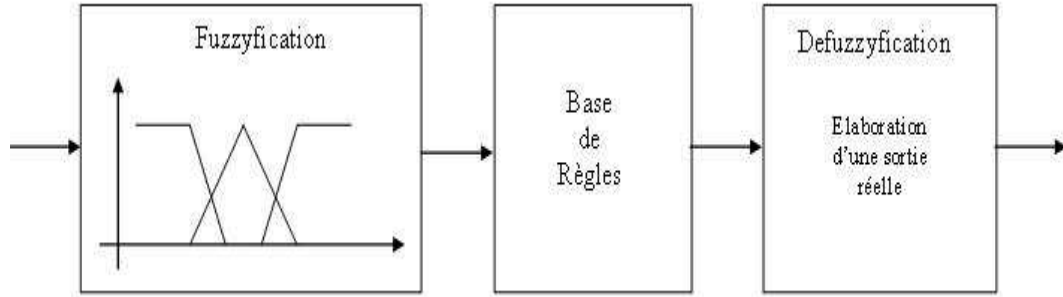


FIG. 1.19 – *Système d'inférence floue*

Deux systèmes d'inférence floue demeurent les plus employés [50] : Il s'agit des systèmes utilisant la defuzzification de Mamdani [51] et de Takagi-Sugeno-Kang [52]. Dans le modèle de Mamdani, les conséquences des règles d'inférences c'est-à-dire, les sorties du système d'inférence floue, sont représentés par des ensembles flous ou variables linguistiques tandis que dans le modèle de Takagi-Sugeno-Kang, ces conséquences sont représentées directement par des variables réelles.

D'aucuns pensent que la logique floue constitue la dernière étape dans le développement des modèles d'inter-distance. La logique floue essaie en effet d'opérer une imitation parfaite du comportement d'un conducteur humain. La première utilisation de la théorie de la logique floue a porté sur un modèle proportionnel de General Motors (GM), dans lequel la vitesse relative, la distance et l'accélération du véhicule leader étaient considérées comme les entrées du système [53]. Le modèle a transformé les variables d'entrée en des termes linguistiques en recourant à des fonctions d'appartenance pour définir ces termes. Par exemple, la distance entre les véhicules était qualifiée par l'emploi de termes tels que *petite*, *très petite*, *adéquate* etc. Une fonction mathématique (triangulaire) décrivait chacun d'eux. Le degré de vérité d'appartenance d'une distance relative quelconque à un terme était codé par un coefficient entre 0 et 1. Après transformation des entrées en termes linguistiques, un ensemble de règles décrivait la réponse du conducteur du véhicule suiveur en réaction aux entrées. Une règle typique est de la forme :

***SI** Distance relative "Adéquate", Vitesse relative est "Presque Zéro" et Accélération du véhicule leader est "Modérée" **ALORS** Véhicule suiveur doit accélérer "Modérément"*

La sortie de la règle floue était alors transformée en valeur numérique (defuzzification), semblable à la transformation des entrées en termes linguistiques.

En 1999, Inokuchi et al [54] présentèrent une approche similaire en incorporant un réseau de neurones pour améliorer l'algorithme de contrôle. Le réseau de neurones est une représentation grossière d'un cerveau biologique qui apprend par expérience ou sur la base d'exemples. En appliquant un réseau de neurones à un ensemble de données correspondant à des comportements passés, le modèle apprend à reproduire ces comportements. Dans le modèle de poursuite neuro-fuzzy, les caractéristiques du véhicule suiveur étaient observées

à partir d'un ensemble de données et le processus d'apprentissage consistait à pondérer les synapses ou connections entre les neurones du modèle. Le réseau de neurones était implémenté sur la base de règles de logique floue pour donner une estimation des actions du conducteur. De nombreux travaux illustrent l'application de la logique floue dans les applications de l'aide à la conduite automobile. Le lecteur intéressé pourrait lire par exemple [55–57] à titre d'exemples.

### 1.3.2.6 Politiques d'inter-distance basées sur micro simulation

La disponibilité d'ordinateurs puissants et rapides a facilité le développement de micro-simulations très complexes de modèles. Le comportement humain est décrit à travers un vaste ensemble d'instructions du type *si...alors...*. Dans cette approche, le comportement du conducteur autant que les caractéristiques dynamiques du véhicule à savoir sa position, sa vitesse, son accélération sont calculées à chaque pas. Le projet SMART-TEST financé par la Commission Européenne [58] a identifié 58 micro-simulations ; 32 d'entre elles ont été analysées. Certaines de ces simulations modélisent à la fois le comportement du véhicule suiveur que les changements de voie de chaque véhicule du trafic. La poursuite dans ces simulations est souvent décrite sur les bases de la modélisation psycho-espacement. Comme exemples de micro-simulations on peut citer ATMSUN2 [59] et FOSIM [60].

La communauté scientifique dispose donc de nombreuses approches pour garantir un contrôle efficace d'inter-distance entre véhicules se suivant dans un trafic. Si le besoin d'amélioration de la sécurité et du confort a conduit au développement des systèmes ACC, un autre problème de taille nécessite d'être affronté. L'implémentation des systèmes de contrôle d'inter-distance a en effet, le plus souvent été réalisée dans un contexte de deux véhicules dont le véhicule suiveur est considéré comme l'hôte du système. Si cette approche a bien permis d'améliorer la sécurité et le confort, elle ne permet pas d'évaluer l'impact réel des systèmes ACC dans un trafic macroscopique. Par exemple, un système ACC performant du point de vue de la sécurité, du confort et même de la robustesse peut néanmoins avoir de très mauvaises caractéristiques de stabilité en chaîne. L'évaluation de l'impact des systèmes sur cette propriété macroscopique présente dès lors un intérêt justifié.

## 1.4 La stabilité en chaîne

Les premières études sur la stabilité en chaîne ont été réalisées dans les années 1970 [61, 62]. Les manoeuvres d'accélération/décélération induisent des erreurs sur l'inter-distance de sécurité entre le véhicule effectuant la manoeuvre et celui qui le suit. Il est nécessaire de pouvoir décrire la manière dont cette erreur se propage de l'avant d'une chaîne de véhicules vers l'arrière de celle-ci. La propriété de stabilité en chaîne d'un système de véhicules garantit que l'erreur d'inter-distance ne s'amplifie pas en se propageant dans la chaîne. Mathématiquement, si la fonction de transfert de l'erreur de distance d'un véhicule à celle du véhicule qui le suit a une amplitude inférieure ou égale à 1, le système de véhicules est stable en chaîne [63–65]. En notant  $H$  la fonction de transfert relative



aux erreurs d'inter-distance, la condition suivante sera utilisée pour déterminer si une chaîne de véhicules suivant la même loi de commande est stable :

$$\| H(s) \|_{\infty} \leq 1 \quad (1.27)$$

avec  $H$  définie de la manière suivante :

$$H(s) = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{i-1}}, \quad (1.28)$$

où  $\epsilon_i$  est l'erreur d'inter-distance du véhicule  $i$  et  $\epsilon_{i-1}$ , l'erreur d'inter-distance du véhicule  $i - 1$ .

Dans la suite, nous présentons des stratégies de gestion d'inter-distance visant à assurer la stabilité en chaîne.

En la matière, certains travaux font le choix d'une politique d'inter-distance constante entre véhicules. On démontre dans ce cas, qu'un simple système autonome de contrôle d'inter-distance est incapable de garantir la stabilité en chaîne. Une communication inter-véhiculaire V2V est alors indispensable pour obtenir la stabilité en chaîne [66, 67]. On a alors recours aux environnements de trafics de véhicules coopératifs pour permettre la stabilité en chaîne d'une telle politique d'inter-distance. La commande par mode glissant est parfois utilisée [68–70]. Dans ce type de commande, on applique à l'entrée de l'actionneur une commande  $u(t)$  fournie par un algorithme utilisant une fonction  $S$  généralement linéaire de la sortie  $y(t)$  et des dérivées de celle-ci ou de l'erreur en sortie  $\epsilon = y - y_{desire}$  et des dérivées de l'erreur. La fonction  $S$  est appelée par abus de langage *surface de glissement* car ses zéros appartiennent à la surface d'équation  $S = 0$  construite dans l'espace d'état. Pour plus de détails sur la théorie de la commande par mode glissant, le lecteur voudra consulter [71]. La surface glissante peut-être définie comme suit :

$$S_i = \dot{\epsilon}_i + \frac{\omega_n}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} \frac{1}{1 - c_1} \epsilon_i + \frac{c_1}{1 - c_1} (v_i - v_l), \quad (1.29)$$

où  $v_i$  et  $v_l$  correspondent aux vitesses longitudinales du véhicule  $i$  et du véhicule leader de la chaîne, respectivement.

En posant

$$\dot{S}_i = -\lambda S_i, \quad (1.30)$$

avec

$$\lambda = \omega_n (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (1.31)$$

On trouve que l'accélération désirée pour le véhicule commandé est :

$$\ddot{x}_{ides} = (1 - c_1)x_{i-1}'' + c_1\ddot{x}_l - (2\xi - c_1(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}))\omega_n\dot{\epsilon}_i - (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n c_1(v_i - v_l) - \omega_n^2\epsilon_i \quad (1.32)$$

Dans cette relation  $c_1$  vérifie  $0 < c_1 < 1$  et peut être vu comme un facteur de pondération de la vitesse et de l'accélération du véhicule leader. Le gain  $\xi$  est équivalent à un facteur d'amortissement et peut être fixé à 1 en amortissement critique. Le gain  $\omega_n$  est la largeur de bande du contrôleur. L'équation 1.30 garantit la convergence de la surface glissante vers zéro. Si l'ensemble des véhicules de la chaîne est soumis à la même stratégie de commande, alors chaque véhicule du système sera à même de suivre le véhicule qui le précède avec une inter-distance constante. En d'autres termes, l'erreur d'inter-distance converge vers zéro en l'absence d'accélération/décélération du véhicule leader.

Dans ce cas l'obligation d'une coopération entre les véhicules vient des signaux nécessaires pour écrire la loi de commande 1.32 où l'on voit que des informations sont requises non seulement sur la dynamique du véhicule précédent (ce qu'un système autonome pourrait extraire à l'aide d'un radar FMCW par exemple) mais aussi sur celle du véhicule leader de la chaîne. Un système de communication sans fil dans lequel le leader communique sa dynamique est donc indispensable dans cette stratégie à inter-distance constante. On remarque néanmoins que dans ce cas-ci une communication unidirectionnelle du leader vers les véhicules suiveurs suffit. D'autres stratégies ont également été proposées.

Peter Cook [72] essaie, dans une stratégie d'inter-distance à temps constant  $h$ , de sélectionner des paramètres de contrôle de manière à garantir une stabilité en chaîne de systèmes de véhicules tout en prenant en compte les contraintes de sécurité et de confort. Le contrôle se déroule également dans un environnement coopératif de différents niveaux. A tout instant, l'accélération et la secousse (jerk en anglais) des véhicules commandés sont considérés bornés de la manière suivante :

$$|\ddot{x}_i(t)| \leq \alpha \quad (1.33)$$

$$|\dddot{x}_i(t)| \leq \beta, \quad (1.34)$$

$i$  désignant l'indice de position du véhicule concerné dans la chaîne et  $x_i$  sa position par rapport à un repère. L'inter-distance entre les véhicules d'indices  $i$  et  $i - 1$  de la chaîne  $\epsilon_i$  est évaluée comme suit :

$$\epsilon_i = x_{i-1} - x_i - L, \quad (1.35)$$

où  $L$  désigne la longueur d'un véhicule.

Sur ces bases, Peter Cook démontre que si l'on se place dans un environnement non nécessairement coopératif (seul l'information sur le véhicule directement précédent compte, cas unidirectionnel), la stabilité en chaîne ne peut être assurée pour une stratégie à temps constant  $h$  que lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$h \geq (2 - \sqrt{2}) \frac{\alpha}{\beta} \quad (1.36)$$

Lorsque chaque véhicule prend en compte les informations sur l'ensemble des  $n$  véhicules qui le précèdent (environnement nécessairement coopératif), la contrainte devient :

$$h \geq \frac{2}{n(n+1)} \frac{\alpha}{\beta} \quad (1.37)$$

Enfin, dans le cas bidirectionnel où les informations proviennent à la fois des véhicules qui précèdent et de ceux qui suivent dans la chaîne, aucune restriction ne s'impose quant à la valeur du temps constant pour assurer la stabilité en chaîne. Seules des contraintes liées à l'inter-distance interviennent pour garantir la sûreté du système.

Liang et Peng proposent une stratégie de contrôle optimale pour garantir une stabilité en chaîne. En partant d'un simple contrôle proportionnel de la forme :

$$u_k = k_1(x_{k-1} - x_k - h\dot{x}_k) + k_2(\dot{x}_{k-1} - \dot{x}_k), \quad (1.38)$$

où  $h$  annonce une stratégie d'inter-distance à temps constant. Le critère suivant est optimisé pour déterminer les valeurs de  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ,  $k_1$  et  $k_2$  qui assurent une stabilité par contrôle optimal :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty \sum_{k=-\infty}^{\infty} [q_1(x_{k-1} - x_k - h\dot{x}_k)^2 + q_2(\dot{x}_{k-1} - \dot{x}_k)^2 + ru_k^2] dt \quad (1.39)$$

Pour un temps constant de valeur  $h = 1.4s$ , les valeurs  $(q_1, q_2, r, k_1, k_2) = (0.1, 0.1, 1, 0.45, 1.44)$  par exemple assurent une stabilité en chaîne avec une marge de stabilité en chaîne valant 4.8. Si l'on considère une chaîne mixte de véhicules ACC et manuels dans laquelle tous les véhicules ACC suivent la loi de commande optimale, la marge de stabilité en chaîne désigne le nombre de véhicules manuels dont l'instabilité structurelle peut être corrigée par un seul véhicule ACC. En d'autres termes, dans le cas ici mentionné, lorsqu'une chaîne de véhicules comprend un seul véhicule ACC doté d'une stratégie de commande optimale et de 4.8 véhicules manuels, la chaîne de véhicules formée sera stable en dépit du fait que le comportement humain (model de Pipes) est instable du point de vue de la stabilité en chaîne. On peut noter que dans cette stratégie l'information utilisée provient du véhicule contrôlé et de celui qui le précède directement. La stratégie est donc conçue pour fonctionner dans un environnement non coopératif.

## 1.5 Conclusion

Le développement d'un contrôle avancé dans le secteur de l'automobile nécessite l'utilisation de capteurs de différentes natures selon les besoins précis de l'application visée. Ces capteurs recueillent les informations sur l'environnement du véhicule. Les données ainsi récoltées nécessitent d'être interprétées avant que des décisions convenables ne puissent être prises par des systèmes embarqués qui implémentent différentes politiques de contrôle.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'état actuel des systèmes de perception passifs et actifs, avec un accent particulier sur les technologies radar dans le volet des systèmes de détection actifs. Nous avons également présenté différentes approches de régulation de l'inter-distance véhiculaire. Certaines de ces approches sont inspirées par la perception psychologique de l'individu observateur au volant, d'autres définissent des distances de sécurité fondées sur la capacité de freinage d'un véhicule automobile, et d'autres encore sont construites sur les techniques de logique floue et de réseaux de neurones. Enfin, nous avons exploré l'état actuel des travaux sur la stabilité des chaînes de véhicules, stabilité induite par les stratégies de contrôle d'inter-distance.



# Chapitre 2

## Stratégie de contrôle de l'inter-distance véhiculaire

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>52</b>
<b>2.2</b>	<b>Généralités sur la stratégie de commande</b>	<b>54</b>
2.2.1	Notations et hypothèses	54
2.2.2	Objectifs et Principe de la stratégie de commande	55
<b>2.3</b>	<b>Contrôle du véhicule suiveur</b>	<b>55</b>
2.3.1	Le modèle de référence	55
2.3.2	Consistance de la stratégie face aux questions de sécurité - détermination de $d_0$	56
2.3.3	Etude en régime stationnaire	59
2.3.4	Le confort	62
2.3.5	Compatibilité Stop&Go de la stratégie	66
<b>2.4</b>	<b>Robustesse du modèle vis-à-vis des bruits de mesure</b>	<b>68</b>
2.4.1	Etude de l'influence des erreurs de mesures simples	69
2.4.2	Etude de l'influence des erreurs de mesures combinées	71
<b>2.5</b>	<b>Influence des paramètres <math>\alpha</math> et <math>c</math> et auto-adaptativité de la stratégie</b>	<b>73</b>
2.5.1	Influence des paramètres $\alpha$ et $c$	73
2.5.2	Politique d'inter-distance de sécurité optimale	74
2.5.3	Une stratégie capable d'auto-adaptativité	75
<b>2.6</b>	<b>Stratégie à taux de freinage du véhicule leader fini</b>	<b>78</b>
<b>2.7</b>	<b>Prise en compte de la condition initiale</b>	<b>81</b>
<b>2.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>82</b>

---

### 2.1 Introduction

"L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation de toute aventure technologique" disait le physicien Albert Einstein. Et de la technologie, ce n'est pas ce qui manque dans les transports de ce siècle. Les véhicules automobiles, les bateaux, les

trains, les avions ainsi que les navettes spatiales sont autant de prouesses technologiques au service de l'homme dans son besoin de déplacement. Sont-ils pour autant sûrs ? Certainement pas, du moins pour l'instant, à en croire les rapports d'incidents et d'accidents dans ces transports. Pourrait-on se contenter du niveau de sécurité actuel de ces technologies ? Il ne peut en être question puisqu'il y va de la vie d'êtres humains. Aussi s'agit-il dans ce chapitre, de proposer une stratégie sûre, qui assure l'intégrité des passagers de véhicules automobiles en garantissant l'impossibilité de collision entre des véhicules du trafic routier.

Au delà des campagnes de sensibilisation sur le comportement humain, la sécurité dans le transport automobile passe aujourd'hui par les systèmes intelligents d'assistance à la conduite et vise à long terme à réduire autant que possible la part de l'activité humaine dans la tâche de conduite. Or, confier la vie des hommes à des machines nécessite que l'on y fasse vraiment confiance. Dès lors, l'étude, la conception et la réalisation de tels systèmes ne peuvent échapper à une rigueur drastique. Ainsi, exposerons-nous dans ce chapitre, le principe, la modélisation, le fondement mathématique ainsi que les résultats de simulations qui valident l'approche proposée. Mais s'il est incontestable que la sécurité des passagers doit prédominer en matière de transport automobile, faut-il en oublier leur confort ?

Les systèmes d'aide à la conduite doivent veiller en plus de la sécurité, au confort des passagers. Toute conception d'un système quelconque intervenant dans la dynamique du véhicule doit prendre fortement en compte cette nécessité. Ainsi, Moreau et al proposent dans [73] une stratégie de gestion de la dynamique du véhicule basée sur les critères de confort et de tenue de route (sécurité dans les virages notamment) reposant sur la commande CRONE (suspension à Comportement Robuste d'Ordre Non-Entier). De même, Venhovens et al conçoivent dans [23] un contrôleur pour les applications Stop&Go avec une préoccupation constante du confort. Dans la littérature scientifique, le confort est évalué de manière objective à travers les amplitudes de l'accélération et de la dérivée temporelle de celle-ci que l'on désigne par jerk. Nous évaluerons donc également l'accélération et le jerk de la stratégie adoptée afin de juger du confort de celle-ci.

Ce chapitre, qui propose une stratégie de commande longitudinale basée sur un modèle d'accélération de forme exponentielle, est organisé de la manière suivante : après avoir décrit les généralités sur l'approche de commande, nous montrons en quoi elle est sûre, confortable et robuste vis-à-vis de certaines perturbations. Deux cas sont étudiés : dans le premier cas, nous considérons que le véhicule leader est capable d'exécuter un arrêt complet avec un taux de freinage infini et dans le second cas, le véhicule leader a une capacité de freinage maximale finie.

## 2.2 Généralités sur la stratégie de commande

### 2.2.1 Notations et hypothèses

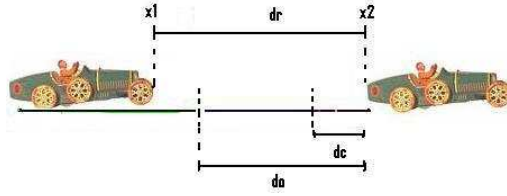


FIG. 2.1 – *Système dans l'état libre*

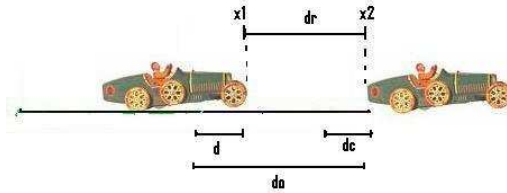


FIG. 2.2 – *Système dans l'état contraint*

La configuration envisagée est celle de deux véhicules appelés respectivement véhicule leader et véhicule suiveur se déplaçant dans le même sens. Les situations de type croisement ou présence d'obstacles ne sont pas envisagées. L'objectif de la stratégie est de contrôler la dynamique du véhicule suiveur de manière à empêcher une quelconque collision avec le véhicule leader tout en assurant le confort à bord. Dans ce système, on considère que le véhicule suiveur est doté d'une capacité de freinage maximale notée  $B_{max1}$ . Dans un premier temps, on considèrera le cas le plus défavorable dans lequel le véhicule leader peut s'arrêter à tout instant avec un taux de freinage infini puis dans une deuxième approche, le véhicule leader sera supposé avoir un taux de freinage maximal fini  $B_{max2}$ .

Comme indiquée sur la FIG.2.1, le véhicule leader est repéré dans ce système par sa coordonnée  $x_2$  tandis que le véhicule suiveur est repéré par la position  $x_1$ . Par conséquent, les vitesses et accélérations de ces mobiles seront respectivement notées  $\dot{x}_2$ ,  $\dot{x}_1$  et  $\ddot{x}_2$ ,  $\ddot{x}_1$ .

On adopte les notations suivantes :

- $d_r = x_2 - x_1$  désigne la distance relative entre les deux véhicules.
- $d_0$  est l'inter-distance de sécurité qui est la distance relative à partir de laquelle le véhicule suiveur devra agir le cas échéant pour éviter une collision.
- $d = d_0 - d_r$  est appelé distance de pénétration.
- $d_c$  est l'inter-distance minimale permise entre les deux véhicules.



## 2.2.2 Objectifs et Principe de la stratégie de commande

La stratégie de commande adoptée repose sur deux objectifs essentiels : garantir la sécurité en empêchant toute possibilité de collision fronto-arrière avec un véhicule leader et assurer le confort à bord du véhicule lors d'une manoeuvre de sauvegarde.

Les FIG.2.1 et FIG.2.2 illustrent les états du système en fonction de la distance relative. Le véhicule suiveur peut donc passer par deux états au regard de sa position relative par rapport au véhicule leader. Lorsque  $d_r > d_0$ , la dynamique du véhicule suiveur est libre, elle n'est pas influencée par celle du leader. Lorsque  $d_r \leq d_0$  la dynamique du véhicule suiveur est contrainte par le comportement du véhicule leader car il doit réagir pour éviter tout risque de collision. Ces constatations permettent donc d'expliquer le principe de la stratégie de la manière suivante (FIG.2.3 :

- Etat libre :  $d_r > d_0$ , la stratégie consistera à laisser le véhicule suiveur libre. En d'autres termes, aucune contrainte ne sera exercée sur sa dynamique.
- Etat contraint :  $d_r \leq d_0$ , la stratégie consistera à asservir l'accélération du véhicule suiveur de manière à garantir l'impossibilité de tout contact avec le véhicule leader.

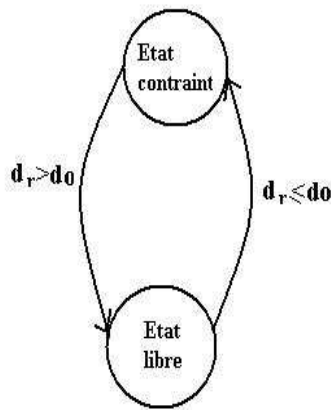


FIG. 2.3 – *Interaction entre l'état non contraint et l'état contraint*

## 2.3 Contrôle du véhicule suiveur

Dans la stratégie, le contrôle de la dynamique du véhicule suiveur se fait à travers un modèle de référence du second ordre (c'est l'accélération qui est contrôlée).

### 2.3.1 Le modèle de référence

Comme annoncé précédemment, le contrôle longitudinal adaptatif du véhicule n'a lieu qu'à partir du moment où  $d_r \leq d_0$ . Autrement dit, le contrôle agit seulement pour  $d \geq 0$  i.e. lorsque le système est dans l'état contraint. On impose alors que l'accélération du véhicule suiveur soit soumise au modèle exponentiel suivant :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{cd} \dot{d}, \quad (2.1)$$

où  $\alpha$  et  $c$  sont des paramètres indépendants de  $d$ , à optimiser pour une inter-distance de sécurité minimale.

Ce profil exponentiel a été choisi afin d'assurer une décélération progressive et continue lors de la phase de contrôle dans l'état contraint.

Nous allons voir à présent comment les contraintes de sécurité imposées par la stratégie permettent de déterminer l'inter-distance de sécurité  $d_0$ .

### 2.3.2 Consistance de la stratégie face aux questions de sécurité - détermination de $d_0$

Nous supposons que le véhicule passe de l'état libre à l'état contraint. Nous choisissons pour origine des temps l'instant où le véhicule suiveur atteint l'inter-distance de sécurité  $d_0$ . Le but ici est de déterminer l'expression de cette distance de sécurité. En tenant compte de l'hypothèse selon laquelle le véhicule leader est à même de s'immobiliser à tout instant avec un taux de freinage infini, ce qui correspond au pire des scénarios envisageables même si de fait il s'agit d'un scénario impossible en pratique. Une stratégie qui réussirait à garantir une absolue sécurité d'anticollision dans ce cas le réussirait donc dans n'importe quel cas réaliste.

Dans ce scénario particulier, on impose que l'inter-distance des véhicules à l'arrêt soit égale à  $d_c$ , c-à-d :

$$d_c = x_2 - x_1 \quad (2.2)$$

L'intégration de l'équation 2.1 conduit à la relation suivante :

$$\dot{x}_1 = -\alpha e^{cd} + \beta, \quad (2.3)$$

où l'on a  $\beta = \alpha + \dot{x}_1(0)$  car à l'instant initial  $t = 0$ , la distance de pénétration  $d$  vaut 0.

En supposant que l'arrêt complet du véhicule suiveur intervient après un parcours de celui-ci sur une distance de pénétration de valeur  $d_m$ , la relation 2.3 permet d'établir alors :

$$e^{cd_m} = 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \quad (2.4)$$

où  $d_0 - d_m = d_c$  d'après la définition de  $d_c$ .

On en déduit la relation suivante entre l'inter-distance de sécurité et les paramètres  $\alpha$  et  $c$  :

$$d_0 = d_c + \frac{1}{c} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \quad (2.5)$$

On constate alors que l'inter-distance de sécurité ne dépend d'aucun paramètre dynamique du véhicule leader et que seule la vitesse initiale du véhicule suiveur est prise en

compte.

Etant donné que le véhicule suiveur est contraint à un taux de freinage borné par  $B_{max1}$ , il convient de s'assurer que les valeurs des paramètres de contrôle du modèle permettent de respecter cette contrainte. Aussi les calculs qui suivent visent-ils à déterminer les conditions sur les paramètres qui garantissent la prise en compte de cette hypothèse. Pour cela nous allons déterminer les extréma de l'accélération en phase de contrôle dans le cas extrême où le véhicule leader est à l'arrêt ( $\dot{x}_2 = 0$ ). La dérivée de l'accélération par rapport au temps s'écrit alors :

$$\frac{d\ddot{x}_1}{dt} = -\alpha c^2 e^{cd} \dot{d}^2 + \alpha^2 c^2 e^{2cd} \dot{d} \quad (2.6)$$

L'accélération est extrémale (on vérifie qu'elle est minimale en fait) lorsque  $\frac{d\ddot{x}_1}{dt} = 0$ . Cela conduit à une valeur  $d$  désignée par  $d^*$  telle que  $\dot{d}^* = \alpha e^{cd^*}$ . Pour  $\dot{x}_2 = 0$  (véhicule leader à l'arrêt), on a  $\dot{d} = \dot{x}_1$  d'où d'après la relation 2.2, on obtient (voir **Annexe B**) :

$$e^{cd^*} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \quad (2.7)$$

Finalement, la valeur minimale de l'accélération est donnée par la relation :

$$a_{min} = \ddot{x}_1(d^*), \quad (2.8)$$

ce qui équivaut à :

$$a_{min} = -\frac{\alpha^2 c}{4} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right)^2 \quad (2.9)$$

Dès lors, la contrainte  $a_{min} = -B_{max1}$  impose la relation suivante :

$$c = \frac{4B_{max1}}{(\alpha + \dot{x}_1(0))^2} \quad (2.10)$$

Il s'en suit donc que le choix du paramètre  $c$  conformément à la relation 2.10 garantit que le véhicule suiveur s'arrête à une inter-distance  $d_c$  avec un taux de freinage n'excédant pas  $B_{max1}$ .

L'inter-distance de sécurité se ré-écrit alors comme suit :

$$d_0 = d_c + \frac{(\alpha + \dot{x}_1(0))^2}{4B_{max1}} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \quad (2.11)$$

La distance de sécurité ainsi définie présente une bonne propriété anti-congestion. En effet les valeurs qu'elle induit sont relativement faibles par rapport aux vitesses mises en

jeu. Cela permet au trafic, de supporter dans des conditions identiques, un nombre plus important de véhicules par comparaison à la stratégie des deux-secondes ou même par comparaison à la stratégie présentée dans [39, 74].

La FIG.2.4 illustre cela en montrant, pour des vitesses identiques, que la stratégie proposée a une inter-distance de sécurité plus faible que celle obtenue pour la règle des deux secondes et la stratégie présentée dans [39, 74]. Sur cette figure les courbes tracées pour la stratégie proposée et celle de Martinez sont les courbes résultant de l'optimisation de chacune des deux approches et le taux de freinage maximal du véhicule leader est choisi égal à  $10m/s^2$  dans les deux cas.

**Remarque :** L'inter-distance de sécurité  $d_0$  permet de passer de l'état libre à l'état contraint. Sa valeur ne change pas dans l'état contraint de sorte que si le système retourne dans l'état libre le véhicule suiveur retrouve sa dynamique d'avant l'entrée dans l'état contraint.

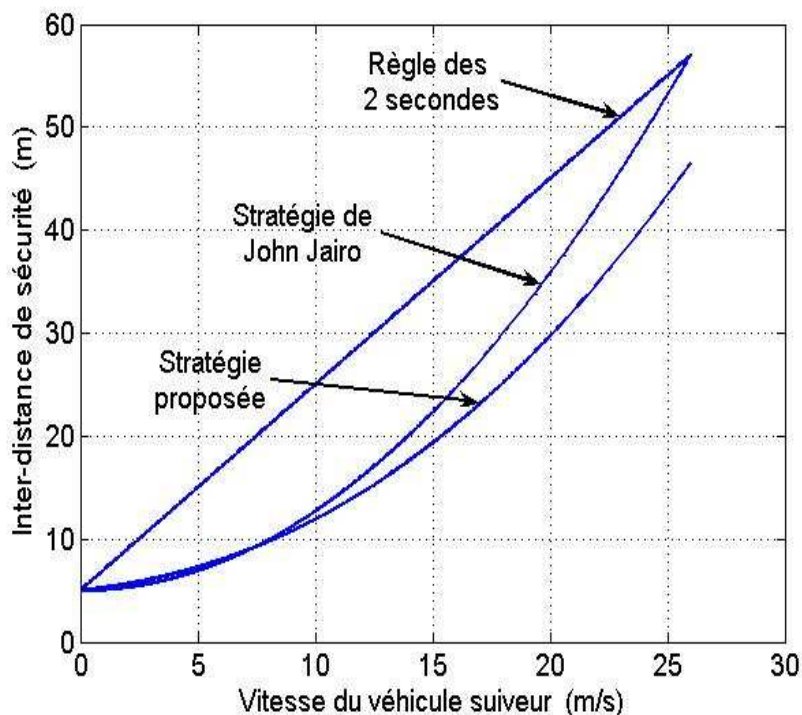


FIG. 2.4 – *Inter-distance de la stratégie vs inter-distance de la stratégie à temps constant et inter-distance du modèle de Martinez.*

Afin de montrer l'efficacité de la stratégie dans les pires conditions de circulation, la FIG.2.5 illustre la réaction du véhicule suiveur dans le cas où le véhicule leader s'arrête avec un taux de freinage infini depuis une vitesse initiale de  $20m/s$ . La vitesse du véhicule suiveur est initialement de  $30m/s$  dans la simulation. On peut noter aisément comment le véhicule suiveur ralentit jusqu'à arrêt complet à une inter-distance  $d_c$  du véhicule leader.

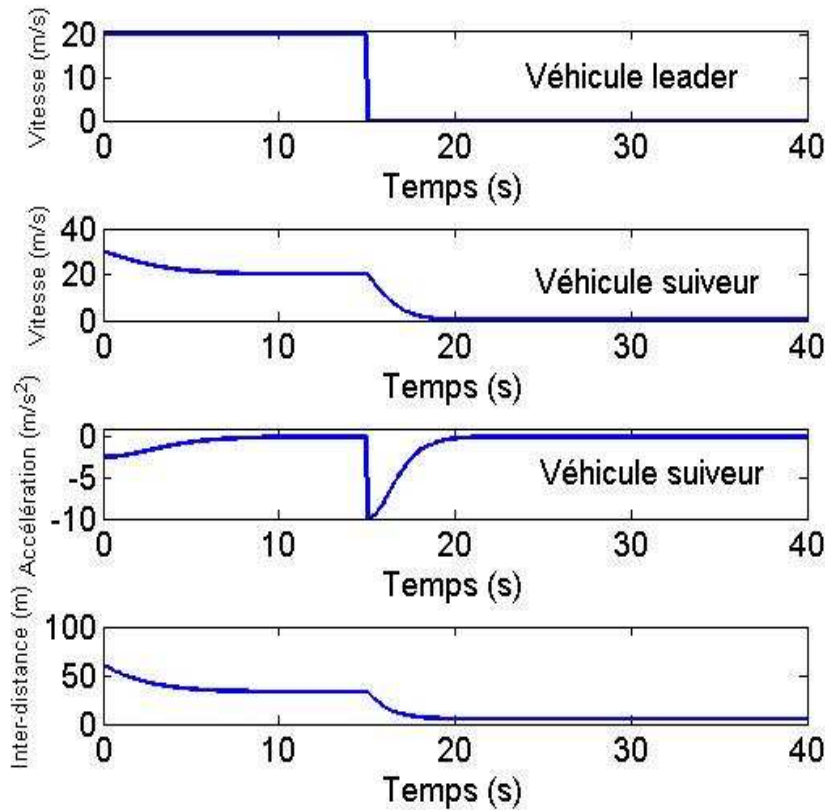


FIG. 2.5 – *Variation de la dynamique du véhicule suiveur en fonction du temps*

La distance de sécurité issue de la stratégie de contrôle se trouve être aussi la distance d'arrêt à l'interdistance  $d_c$  près. C'est de là que vient son indépendance vis-à-vis des caractéristiques dynamiques du véhicule leader. Cela est la conséquence du fait que le leader peut s'immobiliser à tout instant avec une décélération infinie. Dans des configurations fréquentes de trafic, le véhicule leader ne s'arrête pas nécessairement.

Au contraire, sur les autoroutes et même en général hors agglomération, il y a une tendance à rouler à vitesse constante, ce qui nous amène à examiner notre stratégie en régime stationnaire.

### 2.3.3 Etude en régime stationnaire

On considère ici que les deux véhicules roulent en régime stationnaire, c-à-d, que les deux avancent à la même vitesse. L'inter-distance stationnaire de sécurité sera notée  $dr_{st}$  et sera évaluée comme la différence entre l'inter-distance de sécurité  $d_0$  et la distance de pénétration stationnaire  $d_{st}$  qui correspond à la réduction d'inter-distance entre l'instant  $t = 0$  où la stratégie commence à agir jusqu'à l'instant où le véhicule suiveur atteint la vitesse du véhicule leader établissant dès lors une inter-distance constante.

On obtient  $d_{st}$  pour  $\dot{d} = 0$ . Puisque  $d = d_0 - d_r$ , on peut écrire que  $\ddot{d} = -\ddot{d}_r = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2$ . On obtient donc l'égalité suivante :

$$\ddot{d} = -\alpha e^{cd} \dot{d} - \ddot{x}_2, \quad (2.12)$$

ce qui, par intégration fournit l'expression suivante de  $\dot{d}$  :

$$\dot{d} = -\alpha e^{cd} + \beta - \dot{x}_2 \quad (2.13)$$

On en conclut que la distance de pénétration stationnaire vaut :

$$d_{st} = \frac{1}{c} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0) - \dot{x}_2}{\alpha} \right) \quad (2.14)$$

Par conséquent, l'inter-distance stationnaire en régime permanent  $dr_{st} = d_0 - d_{st}$  s'écrit :

$$dr_{st} = d_c + \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{\dot{x}_1(0) - \dot{x}_2}{\alpha}} \right) \quad (2.15)$$

La FIG.2.6 présente l'évolution des caractéristiques dynamiques du véhicule suiveur au cours du temps, dans un scénario où le véhicule leader maintient une vitesse constante de  $20m/s$ . On prend ici  $B_{max1} = 10m/s^2$ ,  $d_c = 5m$  et  $\alpha = 10m/s$ . Le véhicule suiveur a une vitesse initiale de  $30m/s$  à l'instant où il atteint l'inter-distance de sécurité derrière le véhicule leader. Sur ce graphique,  $dr(t)$ ,  $v(t)$ ,  $d(t)$  et  $a(t)$  désignent dans cet ordre la distance relative entre les deux véhicules, la vitesse, la distance de pénétration et l'accélération du véhicule suiveur.

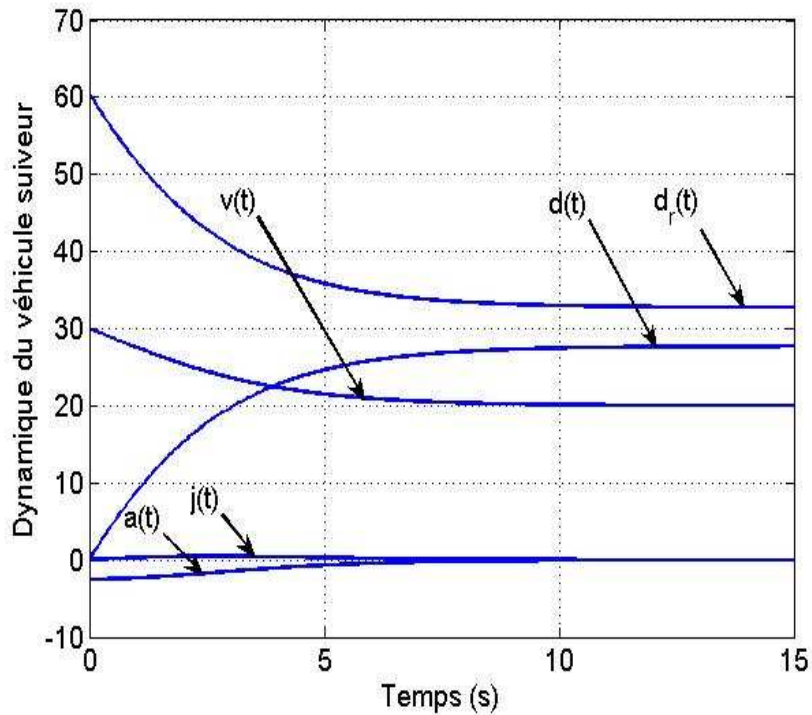


FIG. 2.6 – *Variation de la dynamique du suiveur en fonction du temps. vitesse initiale  $v_0 = 30m/s$ . le leader circulant à la vitesse constante de  $20m/s$ .*

Dans l'état contraint, la stratégie de commande réduit la vitesse du véhicule suiveur jusqu'à égalité de celle-ci avec la vitesse du véhicule leader. On voit dans ce cas que l'inter-distance stationnaire est de  $33m$  environ et qu'une fois cette inter-distance établie, la vitesse du véhicule suiveur demeure constante. L'inter-distance stationnaire en régime permanent est en réalité l'inter-distance de sécurité à la vitesse du véhicule leader.

La sécurité induite par la présente stratégie de contrôle est robuste même face à un comportement inadéquat du véhicule leader. Dans la FIG.2.7, le véhicule leader a un profil de vitesse telle qu'une commutation fréquente a lieu entre l'état libre et l'état contraint (on a une commutation chaque fois que l'inter-distance traverse la ligne en pointillée sur la figure). Mais cette commutation rapide n'a aucune incidence négative sur la sécurité du système et l'on s'aperçoit que lorsque le leader finit par s'arrêter, le véhicule suiveur s'arrête également en respectant l'inter-distance minimale permise  $d_c$ . C'est que le véhicule suiveur retrouve toujours les mêmes caractéristiques dynamiques initiales lors de la transition dans l'état libre. Il n'y a pas d'effet mémoire sur les commutations précédentes et la commande du véhicule suiveur lors d'une transition ne s'en trouve donc pas affectée par les transitions précédentes.

Comme nous avons pu le constater, la stratégie est sûre. Est-elle également confortable ?

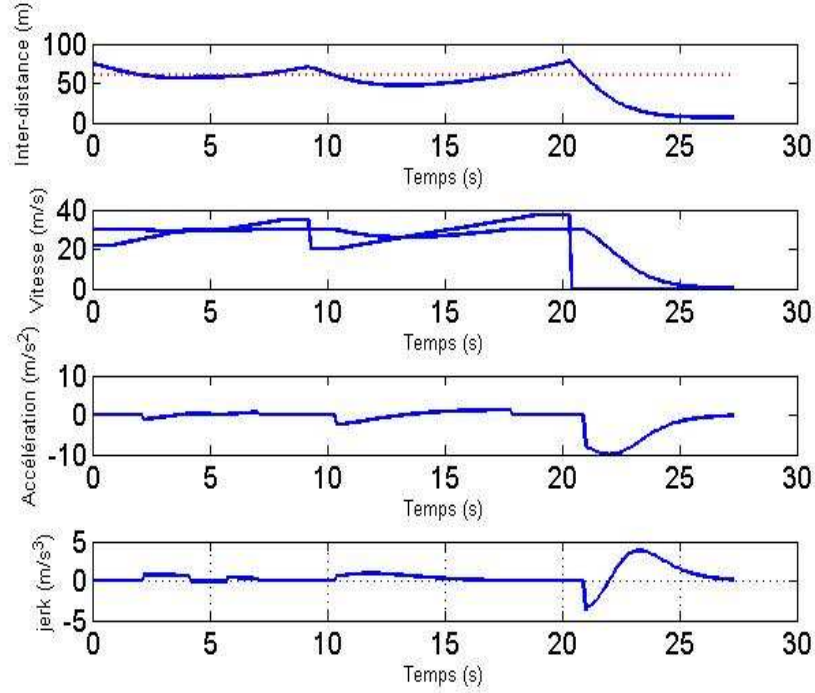


FIG. 2.7 – *Comportement face aux commutations fréquentes entre les phases 1 et 2*

### 2.3.4 Le confort

L'évaluation du confort se faisant à travers les valeurs de l'accélération et de son jerk, nous nous appliquons d'abord à établir l'expression de l'accélération induite par la stratégie en cours de contrôle. Pour ce faire, nous remplaçons dans la relation 2.1  $\dot{d}$  par son équivalent  $\dot{x}_1 - \dot{x}_2$  puis  $\dot{x}_1$  par son expression définie dans la relation 2.3. Le résultat suivant en découle :

$$\ddot{x}_1 = \alpha^2 c e^{2cd} - \alpha c e^{cd} (\beta - \dot{x}_2) \quad (2.16)$$

La FIG.2.8 illustre pour différentes vitesses initiales du véhicule leader, la variation de l'accélération en fonction de la distance de pénétration  $d$ . Dans cette figure, nous considérons le pire des scénarios, c-à-d, celui dans lequel le véhicule leader s'arrête avec un taux de freinage infini.



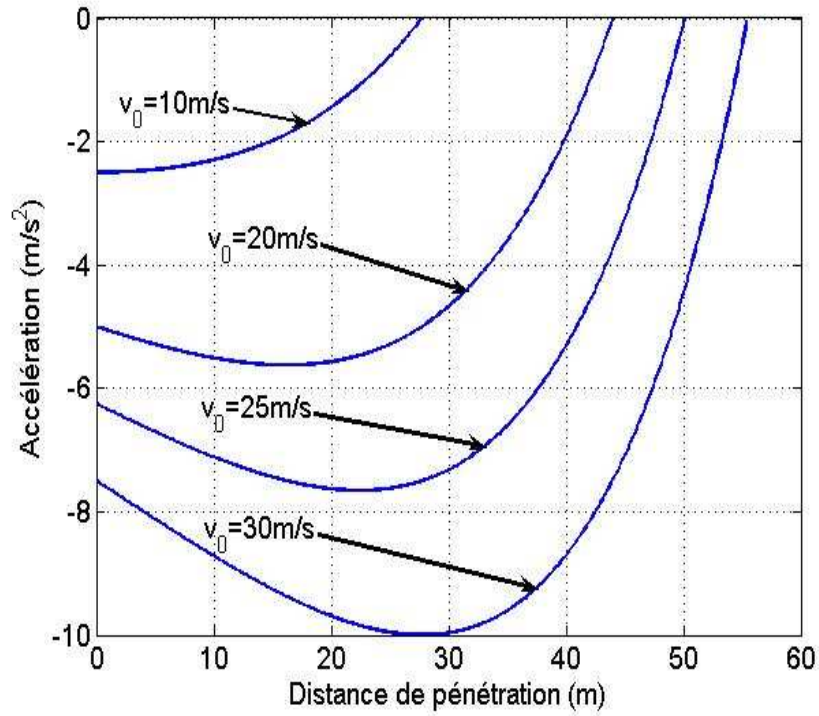


FIG. 2.8 – *Accélération du suiveur en fonction de la distance de pénétration  $d$ . Le leader est supposé à l'arrêt.*

On s'aperçoit, ce qui est logique, que le taux de freinage maximal employé par le véhicule suiveur pour s'arrêter est d'autant plus élevé que sa vitesse initiale l'est ; ce taux ne dépassant pas la valeur de  $B_{max1}$ .

Il est possible, de même, d'évaluer l'expression du jerk du véhicule suiveur. Par définition, il s'agit de calculer la dérivée temporelle de l'accélération. En se servant de la relation 2.12, il est facile d'établir l'équivalence suivante :

$$\ddot{x}_1 = \frac{\partial \ddot{x}_1}{\partial d} \dot{d} = -2\alpha^3 c^2 e^{3cd} + 2(\alpha c)^2 e^{2cd} (\beta - \dot{x}_2) - \alpha c^2 e^{cd} (\beta - \dot{x}_2)^2 + (\alpha c)^2 e^{2cd} (\beta - \dot{x}_2) + (\alpha c) e^{cd} \ddot{x}_2 \quad (2.17)$$

La FIG.2.9 montre l'évolution temporelle du jerk du véhicule suiveur pour différentes valeurs de la vitesse du véhicule leader. Dans chaque cas, le véhicule suiveur a une vitesse initiale de  $30m/s$ .

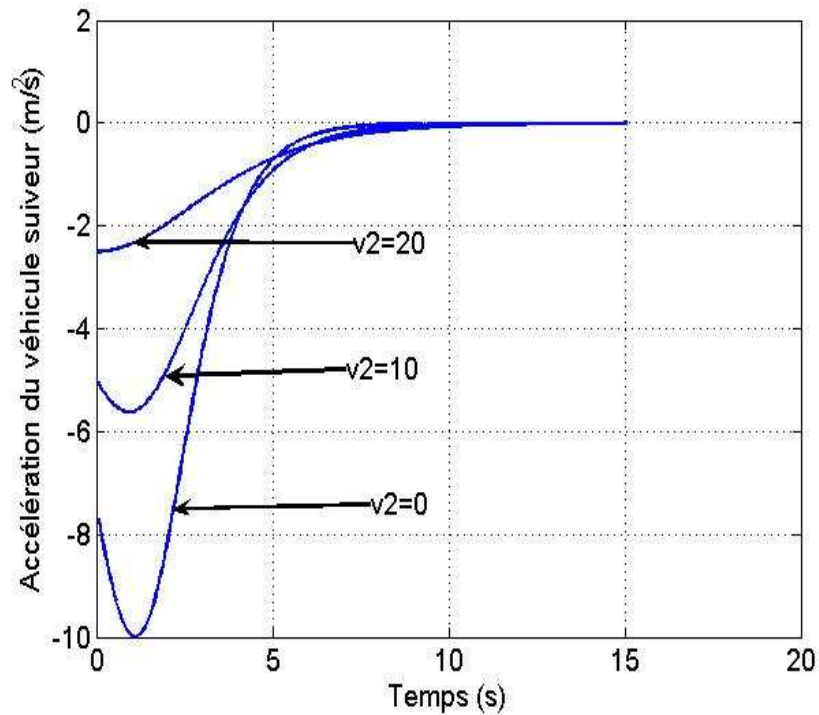


FIG. 2.9 – *Jerk du suiveur en fonction du temps, pour différentes vitesses du leader.*

On y constate comment l'amplitude du jerk s'affaiblit pour une vitesse relative faible entre les deux véhicules.

Le profil de décélération proposé dans la stratégie conduit à des résultats satisfaisants sur le confort pour une inter-distance de sécurité faible. Afin d'illustrer ce propos, nous nous appliquons dans la suite à comparer les résultats présentés ici avec ceux issus de la stratégie présentée dans [39, 74] qui est, à notre connaissance, la stratégie la plus proche de celle que nous proposons, dans la littérature. Ainsi, les FIG.2.10 et FIG.2.11 montrent les variations de l'accélération et du jerk du véhicule suiveur dans les cas où celui-ci est gouverné par le profil choisi ici et celui proposé dans [39]. Une stratégie est jugée d'autant plus confortable que les amplitudes d'accélération et de jerk qu'elle induit sont faibles. Dans ces figures, et pour chacune des deux stratégies, le véhicule leader est supposé arrêté (le pire scénario), le véhicule suiveur roule à une vitesse initiale de  $30m/s$  et a une capacité de freinage maximale valant  $B_{max1} = 10m/s^2$ .

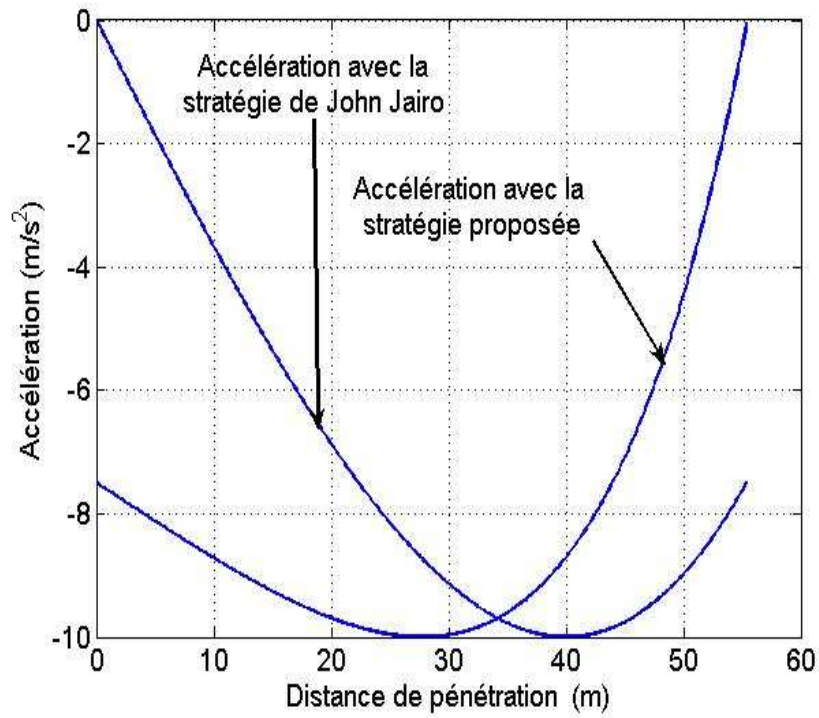


FIG. 2.10 – *Accélération dérivant de la stratégie vs accélération de la stratégie Martinez.*

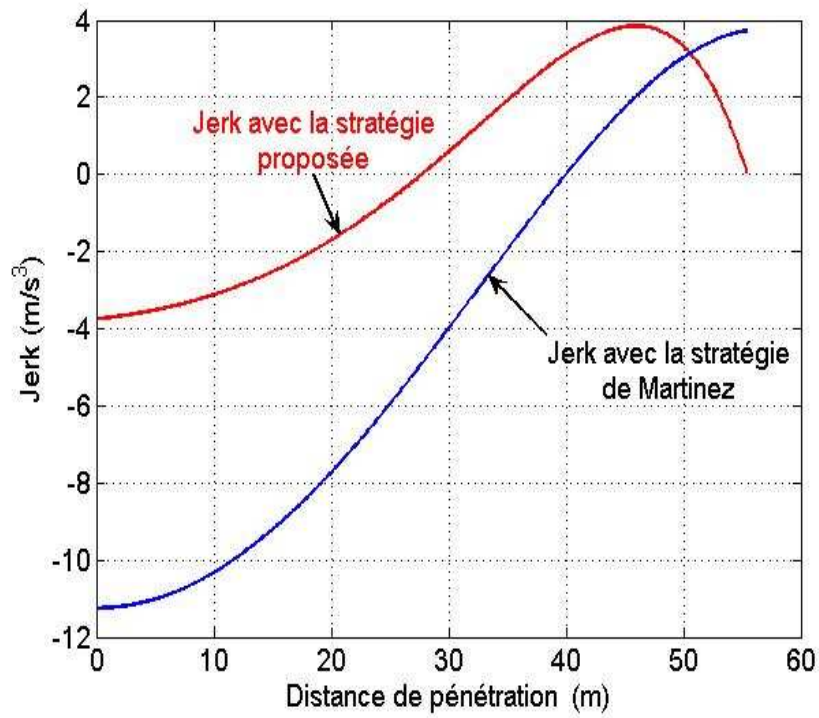


FIG. 2.11 – *Jerk de la stratégie vs jerk de la stratégie Martinez.*

La FIG.2.10 montre que les deux stratégies passent toutes par le même taux de freinage maximal de  $10m/s^2$ . Cependant, pour autant, on voit clairement que la distance de sécurité induite par notre stratégie est beaucoup plus courte. En d'autres termes, le modèle proposé réduit la distance de sécurité sans dégrader le confort par rapport au modèle de comparaison bien au contraire.

En effet, sur la FIG.2.11 on constate que l'amplitude du jerk induit par la stratégie adoptée ici est bornée par  $4m/s^3$  tandis que celle du modèle de comparaison est bornée par plus de  $11m/s^3$ . On peut en conclure que le modèle choisit, en plus de réduire l'inter-distance de sécurité, améliore le confort à bord du véhicule suiveur.

La sécurité et le confort qui découlent de la stratégie rendent celle-ci convenable pour une application de régulation de vitesse intelligente. De telles applications conviennent la plupart du temps à des conduites en milieux autoroutiers où la circulation se fait dans les conditions normales à vitesse soutenue. Cette stratégie pourrait-elle convenir à une implémentation au delà de ce genre de milieux ? Pourrait-elle convenir par exemple à une conduite en environnement péri-urbain voire urbain où on est contraint à des mouvements fréquents de démarrage-arrêt (Stop&Go) ?

### 2.3.5 Compatibilité Stop&Go de la stratégie

Supposons un véhicule leader qui vienne à s'arrêter. Alors, le véhicule suiveur ralentira jusqu'à arrêt complet également. Lorsque les deux véhicules sont à l'arrêt, on a de façon triviale une vitesse relative nulle,  $\dot{d}_r = 0$ . Si le véhicule leader se remet alors en mouvement, il fait passer la vitesse relative d'une valeur nulle à une valeur strictement négative. Il s'en suit que l'accélération du véhicule suiveur passe d'une valeur nulle à une valeur strictement positive. En conclusion, lorsque le véhicule leader accélère pour repartir, le véhicule suiveur accélère pour le suivre. Ainsi cette stratégie est-elle compatible également avec les applications Stop&Go. Pour illustrer cela, nous présentons ici deux résultats de simulations. La première simulation a lieu dans un environnement idéal, sans bruit ; la deuxième, quant à elle, intervient dans un environnement bruité c'est-à-dire un environnement dans lequel on considérera que les mesures sont entachées d'erreurs.

#### 2.3.5.1 Stop&Go en milieu non bruité

Nous avons conçu un profil test de circulation du véhicule leader incluant à la fois le maintien de vitesse constante et des scénarios Stop&Go à travers des arrêts brusques. Le véhicule suiveur est supposé rouler à une vitesse initiale de  $30m/s$  et a une capacité de freinage maximale de valeur  $B_{max1} = 10m/s^2$ . L'inter-distance minimale permise à l'arrêt des deux véhicules vaut  $d_c = 5m$ . La configuration initiale est définie par une inter-distance relative  $d_r = d_0 = 60m$  avec une vitesse initiale du véhicule leader de  $20m/s$ .

Dans le scénario illustré FIG.2.12, où les caractéristiques dynamiques du véhicule suiveur sont représentées par des lignes continues et celles du véhicule leader par des lignes discontinues, le véhicule suiveur ralentit de façon confortable jusqu'à ce que sa vitesse égale celle du véhicule leader. Alors, il se maintient à l'inter-distance de sécurité stationnaire qui vaut environ  $33m$  dans cette simulation. A l'instant  $t = 27s$ , le véhicule

leader exécute un arrêt brusque avec un taux de décélération d'environ  $10m/s^2$  avec un jerk de  $20m/s^3$ . Le véhicule suiveur freine jusqu'à arrêt avec une décélération valant à peine  $8.5m/s^2$  et un jerk d'amplitude inférieure à  $4m/s^3$ . On voit que l'inter-distance à l'arrêt du véhicule suiveur vaut bien  $5m$ . Lorsqu'à l'instant  $t = 39s$ , le véhicule leader se remet en mouvement, le véhicule suiveur le suit également.

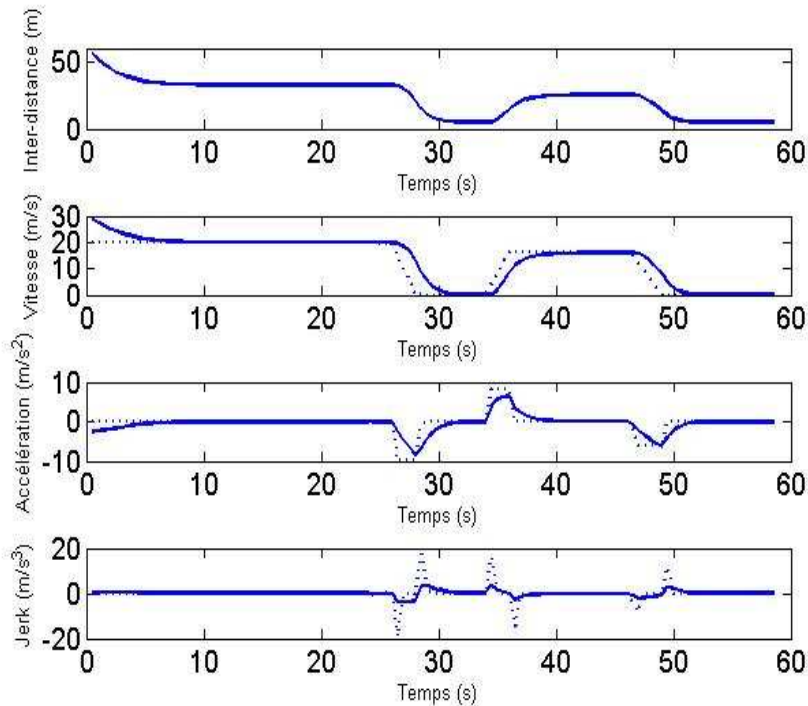


FIG. 2.12 – *Stop&Go en milieu non bruité*

### 2.3.5.2 Stop&Go en milieu bruité

Dans cette partie, nous simulons la stratégie proposée en utilisant le même profil de conduite pour le véhicule leader et les mêmes conditions initiales que dans le cas de l'environnement non bruité. Par contre, le profil de vitesse du véhicule leader est entaché d'un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance  $0.4m/s$ . La vitesse du véhicule leader, vue du véhicule suiveur est alors donnée par :

$$\hat{x}_2 = \dot{x}_2 + \mu_2 \quad (2.18)$$

où  $\mu_2$  désigne le signal du bruit gaussien.

La FIG.2.13 indique la réponse du véhicule suiveur dans une telle condition. L'inter-distance de sécurité est presque inchangée, l'accélération ainsi que le jerk sont légèrement dégradés. Toutefois, on constate que le jerk est l'indice le plus touché. En effet l'amplitude maximale de la décélération varie de  $8.5m/s^2$  dans le cas non bruité à seulement  $8.55m/s^2$  dans le cas bruité tandis que l'amplitude maximale de jerk, elle, varie de moins de  $4m/s^3$  à  $4.4m/s^3$ .

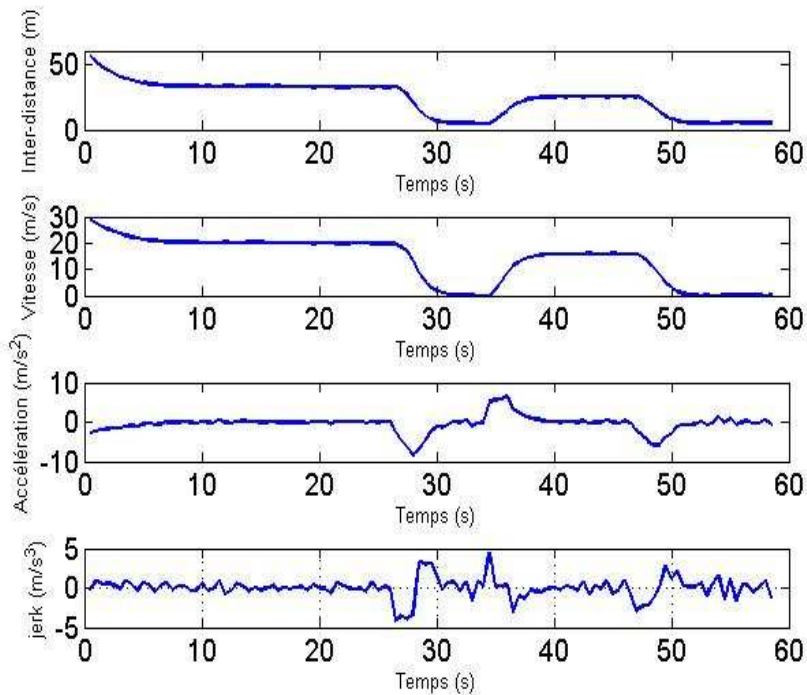


FIG. 2.13 – *Stop&Go en milieu bruité*

En pratique, les véhicules circulent dans un environnement toujours bruité. De même les systèmes de détection et de localisation radar (ou autres) qui fournissent les données utilisées pour un contrôle en temps réel sont entâchées d’erreurs. Cette situation rend donc intéressante l’analyse de la robustesse de la stratégie face aux bruits de mesure.

## 2.4 Robustesse du modèle vis-à-vis des bruits de mesure

Considérons un scénario pratique dans lequel, le système de détection et de mesure d’inter-distance et de vitesse relative rapporterait des mesures entâchées d’erreurs. Cela relève plutôt de l’ordinaire dans ce genre d’application puisque les systèmes radar et autres souffrent d’un minimum d’erreurs dues aux bruits dans l’environnement de mesure et même simplement à l’imperfection de ces systèmes de mesure. Il est évident que ces erreurs ont une influence négative sur le modèle de référence. L’objectif étant de proposer une stratégie la plus sûre possible, existe t-il un moyen de contenir l’impact de ces erreurs ? D’abord, on remarque que ces erreurs peuvent influencer le modèle de référence en sous-estimant l’inter-distance de sécurité ou au contraire en surestimant cette inter-distance. Dans le cas où ces erreurs conduisent à une inter-distance plus grande que nécessaire, la sécurité n’est pas menacée, seule la propriété anti-congestion de la stratégie est amoindrie.

Au contraire lorsque les erreurs conduisent à asservir le véhicule suiveur à une inter-distance plus faible que l'inter-distance de sécurité, l'intégrité des passagers s'en trouve menacée et c'est à ce cas que nous allons nous intéresser dans cette partie. Pour ce faire, nous allons étudier l'influence de différentes erreurs de mesures (sur la distance de pénétration et sur la vitesse de pénétration) en commençant par les effets d'erreurs simples et en terminant sur les effets d'erreurs combinées (erreur de mesures doubles sur distance et vitesse).

## 2.4.1 Etude de l'influence des erreurs de mesures simples

### 2.4.1.1 Erreur de mesure constante sur $d$

Désignons par  $\epsilon_d$ , l'erreur constante de mesure sur la distance de pénétration  $d$ . Le profil résultant d'accélération d'asservissement est alors :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{c(d+\epsilon_d)} \dot{d} \quad (2.19)$$

La distance d'arrêt  $d_m$  qui en découle est comme suit :

$$d_m = \frac{1}{c} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha e^{c\epsilon_d}} \right) \quad (2.20)$$

Par conséquent, l'erreur de mesure  $\epsilon_d$  constante sur la distance de pénétration  $d$  induit une erreur sur la distance d'arrêt du véhicule suiveur. La distance erreur correspondante peut être évaluée par  $d_{err} = d_m(\epsilon_d = 0) - d_m(\epsilon_d \neq 0)$  soit :

$$d_{err} = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha e^{c\epsilon_d}}} \right) \quad (2.21)$$

### 2.4.1.2 Erreur de mesure proportionnelle sur $d$

En désignant par  $r_1$  le taux d'erreur proportionnelle de mesure sur  $d$ , la nouvelle accélération du véhicule contrôlé devient :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{c(1+r_1)d} \dot{d} \quad (2.22)$$

L'erreur  $d_{err}$  résultante s'écrit :

$$d_{err} = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{(1+r_1)\dot{x}_1(0)}{\alpha}} \right) \quad (2.23)$$

La FIG.2.14 montre comment varie l'erreur sur la distance d'arrêt en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur. La courbe montrant l'influence de l'erreur de mesure

constante est obtenue pour une valeur de  $\epsilon_d = 1m$  et celle sur l'erreur proportionnelle pour une valeur de  $r_1 = 5\%$ .

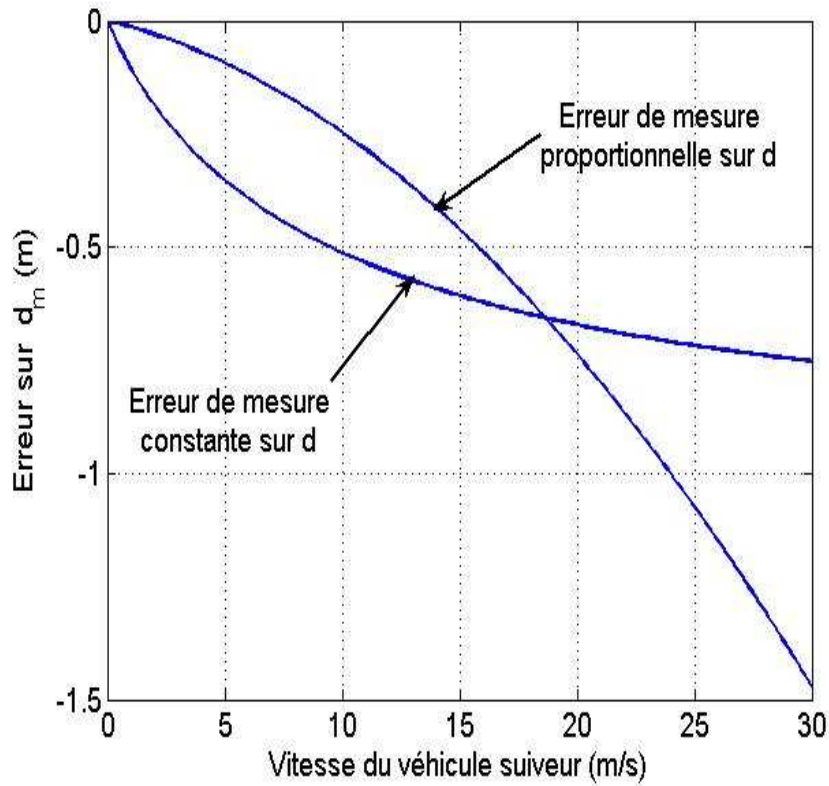


FIG. 2.14 – *Robustesse de la stratégie face aux erreurs constantes et proportionnelles sur la mesure de  $d$ .*

### 2.4.1.3 Erreur de mesure proportionnelle sur $\dot{d}$

En notant  $r_2$ , le taux d'erreur proportionnelle sur la vitesse de pénétration  $\dot{d}$ , on obtient le profil suivant :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{cd} (1 + r_2) \dot{d} \quad (2.24)$$

Il en résulte l'erreur suivante :

$$d_{err} = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{(1+r_2)\alpha}} \right) \quad (2.25)$$

La FIG.2.15 indique la variation de l'erreur sur la distance d'arrêt en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur. Cette figure est obtenue pour une valeur de  $r_2 = 5\%$ .



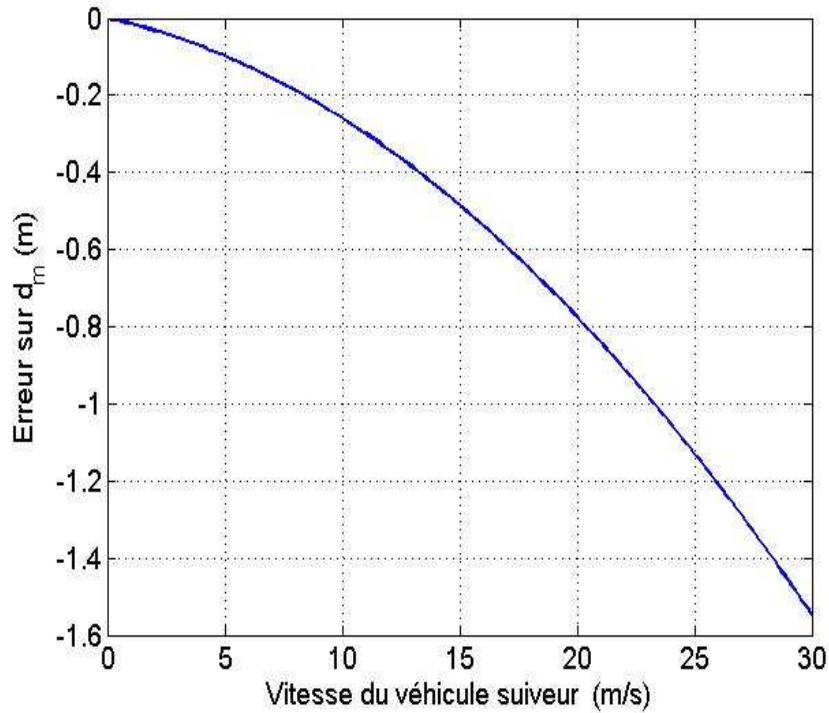


FIG. 2.15 – *Robustesse de la stratégie face aux erreurs de mesure proportionnelles à  $\dot{d}$ .*

Jusque là il a été question d'analyser l'influence des erreurs de mesures simples et on s'aperçoit qu'avec les valeurs choisies, même à 30m/s l'erreur sur la distance d'arrêt ne dépasse guère 1.6m. Qu'en est-il des erreurs combinées ?

## 2.4.2 Etude de l'influence des erreurs de mesures combinées

### 2.4.2.1 Erreur de mesure constante $\epsilon_d$ sur $d$ combinée à une erreur de mesure proportionnelle $r_2$ sur $\dot{d}$

On considère donc ici un profil entâché à la fois d'une erreur constante de valeur  $\epsilon_d$  sur la distance de pénétration  $d$  et une erreur proportionnelle de taux  $r_2$  sur la vitesse de pénétration  $\dot{d}$ . Le profil d'accélération, dans ces conditions devient :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{c(d+\epsilon_d)}(1+r_2)\dot{d} \quad (2.26)$$

Cette double erreur induit une erreur sur la distance d'arrêt du véhicule suiveur que l'on évalue comme suit :

$$d_{err} = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{(1+r_2)\alpha e^{c\epsilon_d}}} \right) \quad (2.27)$$

### 2.4.2.2 Erreur de mesure proportionnelle $r_1$ sur $d$ combinée à une erreur de mesure proportionnelle $r_2$ sur $\dot{d}$

On considère ici que le modèle est entâché d'une erreur proportionnelle de taux  $r_1$  sur la mesure de la distance  $d$  et d'une erreur proportionnelle de taux  $r_2$  sur celle de  $\dot{d}$ . Le profil s'écrit :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{c(1+r_1)d} (1+r_2) \dot{d} \quad (2.28)$$

On évalue l'erreur sur la distance d'arrêt à :

$$d_{err} = \frac{1}{c} \ln \left( \frac{1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha}}{1 + \frac{(1+r_1)\dot{x}_1(0)}{(1+r_2)\alpha}} \right) \quad (2.29)$$

La FIG.2.16 illustre les variations de l'erreur sur la distance d'arrêt en fonction de la vitesse du véhicule suiveur dans les cas précédents d'erreurs combinées. Dans la simulation on a pris  $\epsilon_d = 1m$  et  $r_1 = r_2 = 5\%$ .

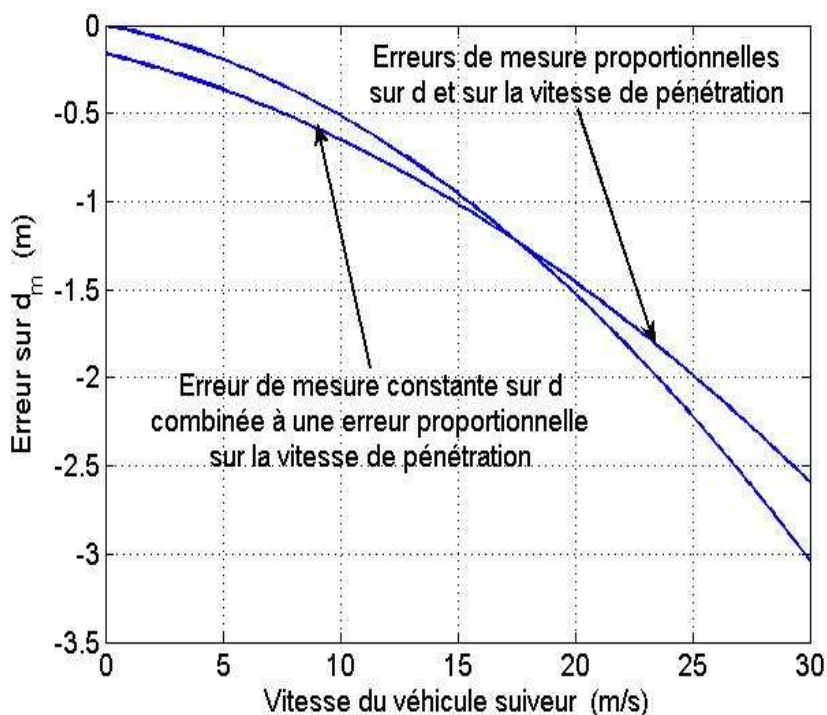


FIG. 2.16 – *Robustesse de la stratégie face aux erreurs de mesure doubles sur  $d$  et  $\dot{d}$ .*

On constate à chaque fois que l'impact d'une erreur est d'autant plus important que la vitesse initiale du véhicule suiveur est élevée. Pour les valeurs d'erreurs choisies pour la simulation ( $r_1 = r_2 = 5\%$ ,  $\epsilon_d = 1m$ ), on peut conclure que l'erreur sur la distance d'arrêt

est bornée par  $d_{err} = 3m$  environ. On peut en déduire que le modèle de la stratégie est robuste puisqu'une double erreur de mesures à la vitesse de  $30m/s$  n'induit que  $3m$  d'erreur sur la distance d'arrêt. La stratégie, prenant en compte cet impact des erreurs de mesure rend le système sûr en choisissant une inter-distance à l'arrêt  $d_c$  telle que  $d_c > d_{err}$ .

## 2.5 Influence des paramètres $\alpha$ et $c$ et auto-adaptativité de la stratégie

### 2.5.1 Influence des paramètres $\alpha$ et $c$

Les paramètres  $\alpha$  et  $c$  jouent un rôle de premier plan dans la stratégie de contrôle d'inter-distance. Ils définissent, avec le taux de freinage maximum du véhicule suiveur  $B_{max1}$  et la vitesse initiale  $x_1(0)$  l'inter-distance de sécurité. Ils influencent de façon importante le confort en agissant à la fois sur l'accélération et le jerk. Ces paramètres agissent en fait comme des agents de contrôle de freinage. La FIG.2.17 montre l'influence de  $\alpha$  pour une valeur constante de  $c$  valant  $c = 0.025m^{-1}$ . Quant à la FIG.2.18, elle illustre l'influence de  $c$  pour une valeur fixée  $\alpha = 10m/s$ . Dans chacune de ces simulations la vitesse initiale du véhicule suiveur est de  $30m/s$  et le véhicule leader est supposé arrêté.

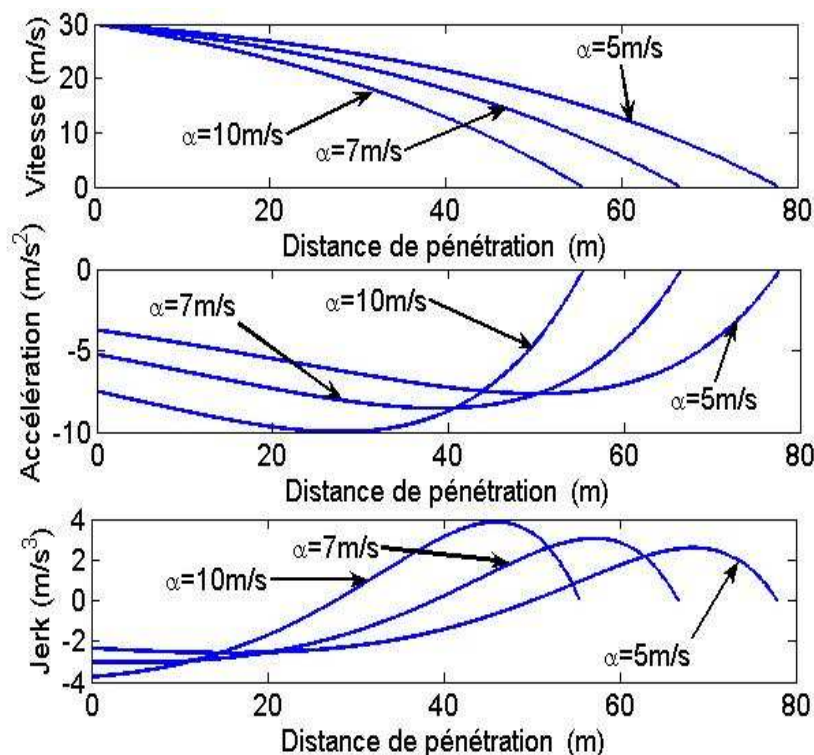


FIG. 2.17 – Influence du paramètre  $\alpha$  sur la stratégie de contrôle.

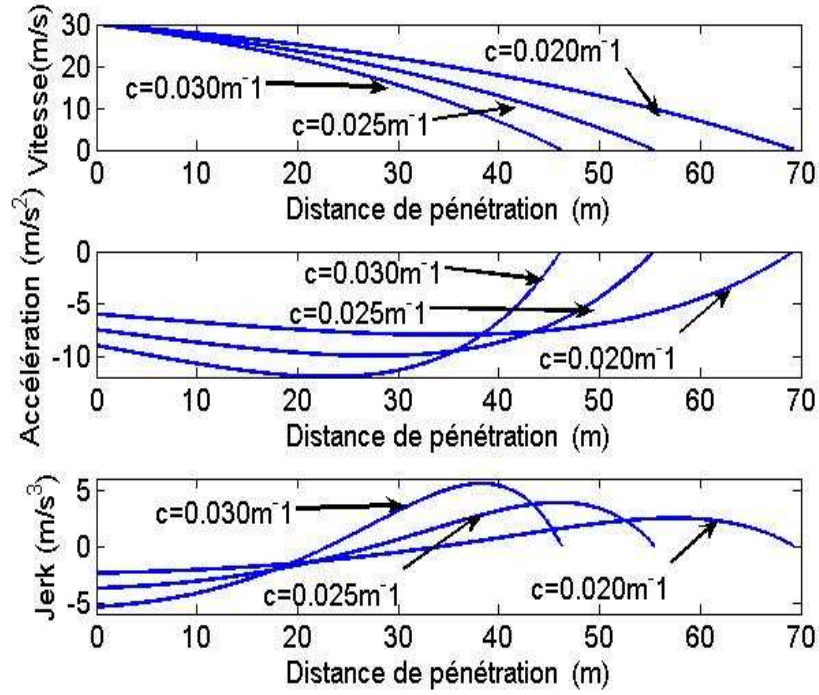


FIG. 2.18 – *Influence du paramètre  $c$  sur la stratégie*

Jusqu'ici les valeurs de  $\alpha$  et  $c$  ont été choisies de manière empirique. D'après les simulations précédentes, les faibles valeurs de  $\alpha$  ou  $c$  augmentent l'inter-distance de sécurité ainsi que le confort, ce qui est somme toute logique. Cela interroge sur l'existence d'un couple  $(\alpha, c)$  conduisant à une inter-distance de sécurité optimale.

## 2.5.2 Politique d'inter-distance de sécurité optimale

Nous nous intéressons ici à l'inter-distance de sécurité optimale (minimale) au regard de tous les couples  $(\alpha, c)$  possibles. Une telle entreprise a pour objectif la lutte anti-congestion. Comme cela a été précédemment établi, les paramètres  $\alpha$  et  $c$  sont liés par la relation 2.10. La recherche du couple  $(\alpha, c)$  optimal pour l'inter-distance de sécurité peut donc passer par la seule recherche du paramètre  $\alpha_{opt}$ . Pour ce faire nous dérivons l'équation 2.11 :

$$\frac{dd_0(\alpha)}{d\alpha} = \frac{\alpha + \dot{x}_1(0)}{2B_{max1}} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) - \frac{\alpha + \dot{x}_1(0)}{4B_{max1}} \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \quad (2.30)$$

La valeur optimale convenant de  $\alpha$ ,  $\alpha_{opt}$  est obtenue pour  $\frac{dd_0(\alpha)}{d\alpha} = 0$ , ce qui implique :

$$\frac{\alpha + \dot{x}_1(0)}{2B_{max1}} \left[ \ln \left( \frac{\alpha + \dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) - \frac{\dot{x}_1(0)}{2\alpha} \right] = 0 \quad (2.31)$$

Après quelques transformations, il s'en suit que  $\alpha_{opt}$  vérifie :

$$\alpha_{opt} e^{\frac{x_1(0)}{2\alpha_{opt}}} = \alpha_{opt} + \dot{x}_1(0), \quad (2.32)$$

Finalement, on obtient :

$$\alpha_{opt} = \min_x \left\| x e^{\frac{x_1(0)}{2x}} - x - \dot{x}_1(0) \right\| \quad (2.33)$$

La FIG.2.19 affiche, en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur, la valeur de  $\alpha_{opt}$  induisant l'inter-distance de sécurité optimale. La figure indique parallèlement la valeur correspondante de  $c$ .

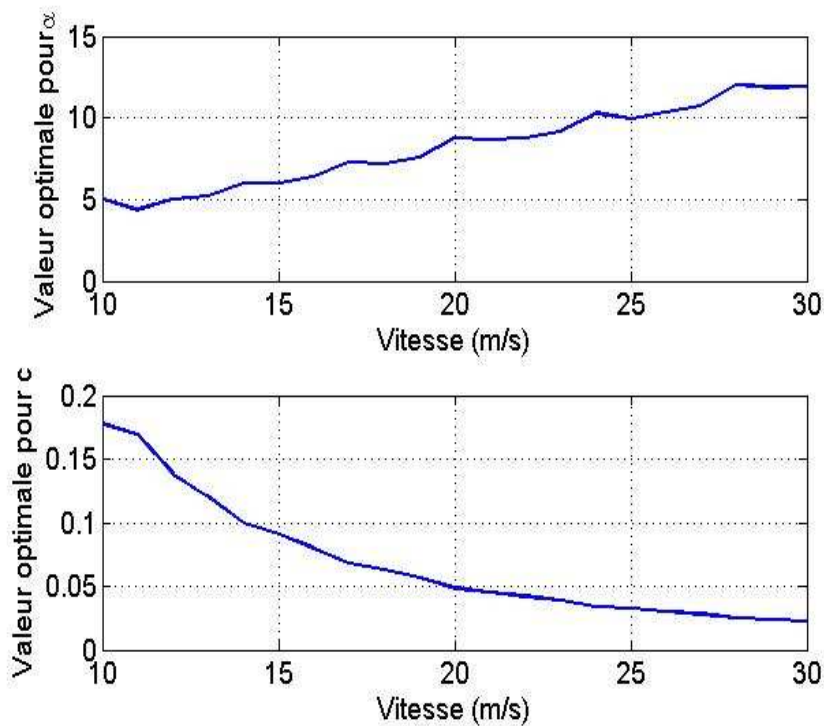


FIG. 2.19 – *Variation de  $\alpha_{opt}$  et  $c$  en fonction de la vitesse initiale du suiveur.*

Un couple  $(\alpha, c)$  constitue dans le système un degré de liberté à la vue de la relation 2.10. Puisque ce degré de liberté permet de manipuler la valeur de l'inter-distance de sécurité, on en déduit que le modèle de la stratégie peut-être ajusté de manière auto-adaptative.

### 2.5.3 Une stratégie capable d'auto-adaptativité

On peut, en faisant varier les valeurs des paramètres  $\alpha$  et  $c$ , modifier à volonté la valeur de l'inter-distance de sécurité (elle ne serait pas alors optimale bien sûr). Cette propriété permet un contrôle auto-adaptatif du modèle de référence avec l'intérêt principal d'établir, pour une vitesse lors du passage de l'état libre à l'état contraint  $\dot{x}_1(0)$

du véhicule suiveur donnée, une inter-distance de sécurité qui soit celle souhaitée par le conducteur. Dans les véhicules équipés de régulateurs de vitesses intelligents, l'intervention du conducteur, sur la pédale de freinage rend prioritaire l'action du conducteur et désactive le système de contrôle électronique. Mais que peut justifier une intervention du conducteur sur un système supposé sûr ? En effet, les conducteurs de véhicules électroniquement contrôlés ont parfois l'impression qu'à l'approche d'un obstacle, le système semble agir tardivement. Le doute sur la stratégie de commande motive donc cette intervention dans certains scénarios. L'intérêt de l'auto-adaptativité est d'évaluer les valeurs des paramètres de contrôle ( $\alpha$  et  $c$ ) qui feraient débiter la manoeuvre de freinage au point où serait intervenu le conducteur et d'utiliser ces paramètres pour agir pareillement dans les mêmes conditions de vitesse initiale. Il s'agit en fait d'anticiper sur l'intervention du conducteur dans des conditions données. Mais comment évaluer les valeurs convenables des paramètres de contrôle ?

Supposons qu'un véhicule contrôlé selon la stratégie suive un véhicule leader à la vitesse initiale  $\dot{x}_1(0)$ . Alors le système de contrôle électronique commencerait à agir à partir d'une inter-distance de sécurité selon l'équation 2.11 avec  $\alpha = \alpha_{opt}$ . Notons  $d_{rconducteur}$ , la distance relative depuis laquelle le conducteur interviendrait. Nous cherchons dans la suite à élaborer un algorithme qui permettent d'évaluer alors les valeurs des paramètres  $\alpha$  et  $c$  qui induiraient une action dès cette inter-distance. En réalité, puisque  $\alpha$  et  $c$  sont liés il suffit de déterminer la valeur de  $\alpha$  convenable.

A cette fin, nous désignons par  $d_{gap}$  la différence entre l'inter-distance optimale (qu'aurait choisi le système) et l'inter-distance effectivement choisie par le conducteur. On a :

$$d_{gap} = d_{manual} - d_0 \quad (2.34)$$

Nous cherchons un modificateur  $\alpha_{mod}$  tel que une fois ce dernier multiplié par  $\alpha_{opt}$ , la valeur  $\alpha$  résultant de ce produit induise une inter-distance de sécurité  $d_{rconducteur}$  conforme aux critères subjectives du conducteur.

Le profil de l'accélération de contrôle s'écrit alors :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha_{opt}\alpha_{mod}ce^{cd}\dot{d} \quad (2.35)$$

et on obtient :

$$\dot{x}_1 = -\alpha_{opt}\alpha_{mod}e^{cd} + \dot{x}_1(0) + \alpha_{opt}\alpha_{mod} \quad (2.36)$$

Si le véhicule suiveur doit s'arrêter pour éviter une collision, sa nouvelle distance d'arrêt devient :  $d_m + d_{gap}$  où  $d_m$  est définie à travers l'équation 2.4 et vaut :

$$d_m = \frac{1}{c} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \quad (2.37)$$

On a alors :

$$-\alpha_{opt}\alpha_{mod}e^{c(d_m+d_{gap})} + \dot{x}_1(0) + \alpha_{opt}\alpha_{mod} = 0, \quad (2.38)$$

Il s'en suit la relation :

$$\alpha_{mod} = \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha_{opt}(e^{c(d_m+d_{gap})} - 1)} \quad (2.39)$$

Ainsi, l'algorithme de contrôle adaptatif se fonde sur l'équation 2.39 pour déterminer la valeur appropriée du modificateur et donc du couple  $(\alpha, c)$  convenable pour l'inter-distance  $d_{rconducateur}$ . Evidemment on a  $\alpha_{mod} = 1$  pour la politique d'inter-distance du système de contrôle. Et pour toute autre politique, on a  $\alpha_{mod} < 1$ .

La FIG.2.20 illustre la variation de  $\alpha_{mod}$  en fonction de l'inter-distance désirée. Dans cette simulation, le véhicule suiveur a une vitesse initiale de  $30m/s$ . On peut observer notamment comment la valeur de  $\alpha_{mod}$  décroît depuis 1 au fur et à mesure que l'inter-distance désirée devient grande.

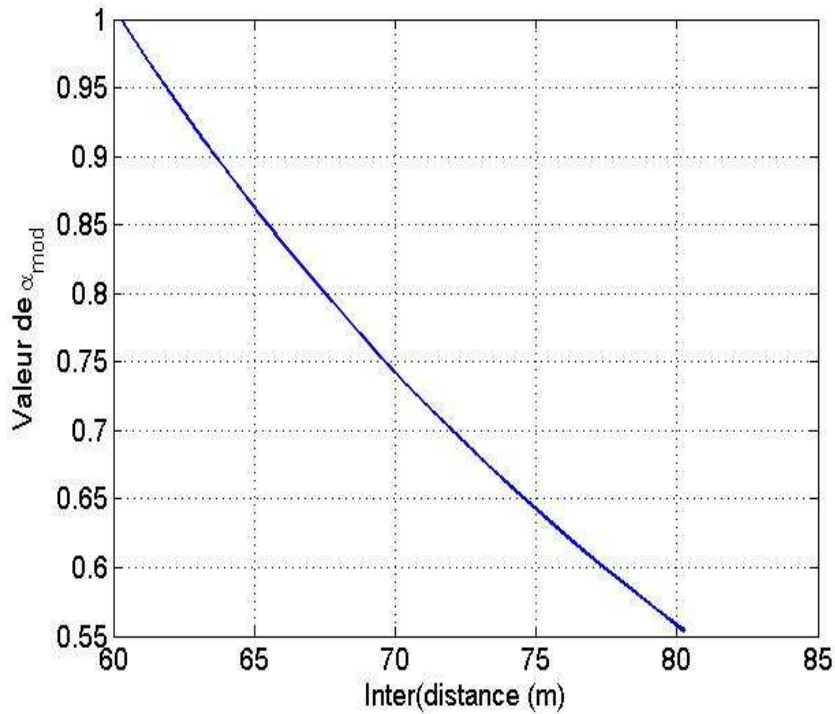


FIG. 2.20 – *Variation de  $\alpha_{mod}$  en fonction de l'inter-distance désirée*

Jusque là, nous avons raisonné avec l'hypothèse très pessimiste que le véhicule leader pouvait s'immobiliser à tout instant avec un taux de freinage infini. Est-il donc possible de garantir le même niveau de sécurité en faisant l'hypothèse d'un taux de freinage désormais fini ?

## 2.6 Stratégie à taux de freinage du véhicule leader fini

En pratique, il est de fait impossible à un véhicule de s'arrêter sur une distance nulle depuis une vitesse initiale non nulle, le taux de freinage est toujours fini. Aussi considérerons-nous dans cette partie que la capacité de freinage maximale du véhicule leader est de  $B_{max2}$ . Mais pourquoi étudier une telle stratégie quand la première stratégie qui fait l'hypothèse la plus défavorable (arrêt instantané du véhicule leader) garantit une sécurité absolue et un confort convenable ? On peut penser a priori que dans l'hypothèse d'un taux de freinage infini le véhicule suiveur a besoin d'une inter-distance de sécurité plus importante. Adopter une stratégie à taux de freinage fini induit donc a priori une inter-distance moindre, ce qui convient davantage contre les congestions de trafic.

Le pire scénario correspond maintenant à un arrêt du véhicule leader suite à un freinage à taux maximal  $B_{max2}$ .

Supposons que le véhicule leader commence une procédure d'arrêt à l'instant  $t = 0$  depuis une vitesse initiale  $\dot{x}_2(0)$ . L'arrêt le plus brusque a lieu donc à taux de freinage  $B_{max2}$ , ce qui implique une durée de manoeuvre de valeur  $t_0$  telle que :

$$t_0 = \frac{\dot{x}_2(0)}{B_{max2}} \quad (2.40)$$

L'évolution temporelle de sa vitesse, illustrée dans la FIG.2.21 peut être exprimée comme suit :

$$\dot{x}_2(t) = \begin{cases} \dot{x}_2(0) - B_{max2}t, & t \leq t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (2.41)$$

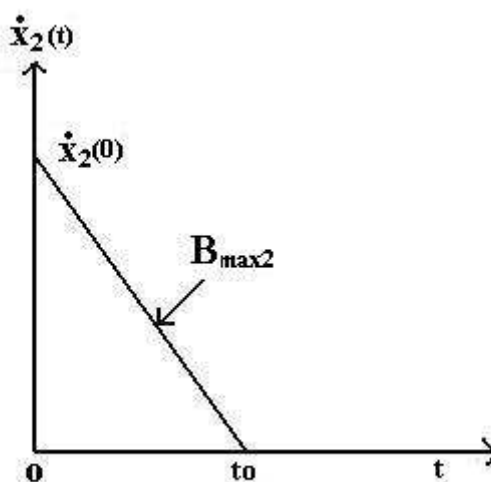


FIG. 2.21 – Variation de la vitesse du véhicule leader lors d'un arrêt à taux de freinage maximal



La détermination de la distance de pénétration du véhicule suiveur se fait alors en deux étapes. Dans un premier temps nous évaluons la distance de pénétration, notée  $d(t_0)$ , depuis l'instant  $t = 0$  jusqu'à l'instant  $t_0$  auquel a lieu l'immobilisation complète du véhicule leader, dans un second temps nous calculons la distance de pénétration supplémentaire  $d_{sup}$  depuis l'instant  $t_0$  jusqu'à l'arrêt complet du véhicule suiveur.

On obtient :

$$d(t_0) = \int_0^{t_0} \dot{d}(t) dt, \quad (2.42)$$

où  $\dot{d}(t)$  est définie dans l'équation 2.13.  
Cela équivaut à :

$$d(t_0) = \int_0^{t_0} (-\alpha e^{cd}) dt + (\beta - \dot{x}_2(0))t_0 + \frac{B_{max2}}{2} t_0^2 \quad (2.43)$$

De même on obtient :

$$\dot{x}_1(t_0) = \int_0^{t_0} (-\alpha c e^{cd} \dot{d}) dt + \dot{x}_1(0) \quad (2.44)$$

Les valeurs  $d(t_0)$  et  $\dot{x}_1(t_0)$  peuvent être évaluées à travers un algorithme numérique itératif (voir **Annexe A** ).

Puisque le véhicule leader est à l'arrêt à l'instant  $t = t_0$ , on peut calculer  $d_{sup}$  en se plaçant dans un contexte de freinage infini dans lequel la vitesse initiale du véhicule suiveur serait  $\dot{x}_1(t_0)$ . On obtient alors l'expression suivante :

$$d_{sup} = \frac{(\alpha + \dot{x}_1(t_0))^2}{4B_{max1}} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(t_0)}{\alpha} \right), \quad (2.45)$$

d'où il vient que la nouvelle distance d'arrêt est  $d_{m2} = d(t_0) + d_{sup}$ . La nouvelle inter-distance de sécurité s'évalue donc comme suit :

$$d_{saf2} = d_c + \int_0^{t_0} (-\alpha e^{cd}) dt + (\beta - \dot{x}_2(0))t_0 + \frac{B_{max2}}{2} t_0^2 + \frac{(\alpha + \dot{x}_1(t_0))^2}{4B_{max1}} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(t_0)}{\alpha} \right) \quad (2.46)$$

Cette nouvelle approche est aussi sûre que l'approche considérant un taux de freinage infini de la part du leader quoique cette dernière soit plus simple et délivre des résultats

évaluables analytiquement. En effet tant que le véhicule leader ne freine pas avec un taux supérieur à  $B_{max2}$ , l'impossibilité d'une collision est assurée. Si le véhicule suiveur détecte un véhicule leader déjà arrêté, la deuxième approche se confond à la première car on a dans ce cas  $\dot{x}_2(0) = 0$ , ce qui implique  $t_0 = 0$  et donc  $d_{safe2}$  a alors l'expression définie en 2.11.

Si donc la nouvelle approche est aussi sûre, a t'elle l'impact escompté sur l'inter-distance de sécurité ?

La FIG.2.22 représente l'allure des inter-distances de sécurité pour les deux approches en fonction de la vitesse du véhicule leader. On peut s'apercevoir en effet que l'inter-distance de sécurité a été réduite dans la seconde approche et que cette réduction est d'autant plus importante que la vitesse du véhicule leader est élevée. Dans la simulation, le véhicule suiveur roule à la vitesse initiale de  $30m/s$ . Les deux véhicules ont un taux de freinage maximal identique  $B_{max1} = B_{max2} = 10m/s^2$ .

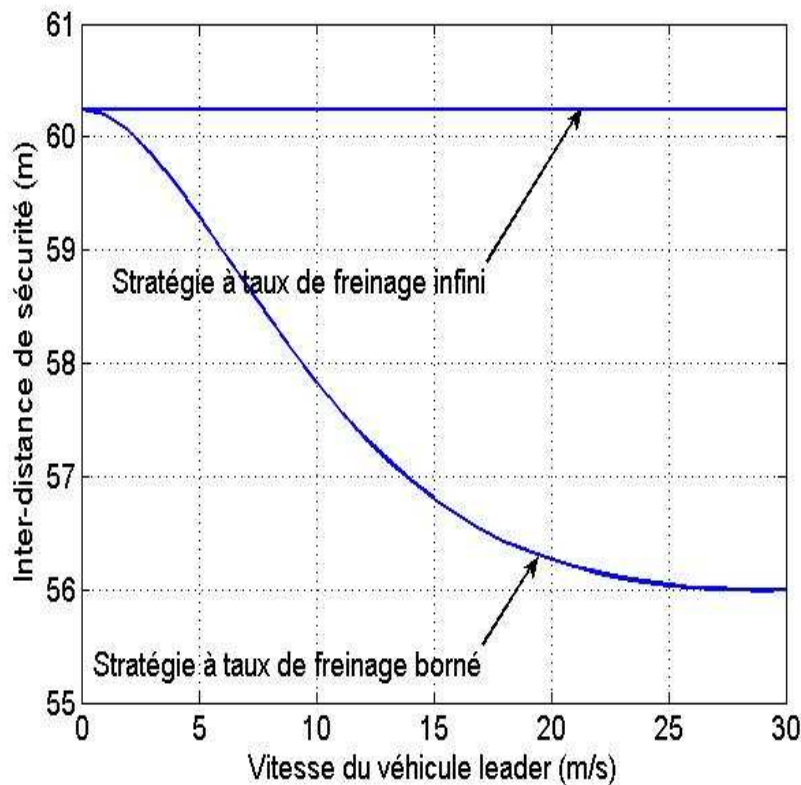


FIG. 2.22 – *La stratégie à taux de freinage fini réduit l'inter-distance de sécurité.*

La FIG.2.23 compare, en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur, les inter-distances de sécurité issues de la règle des deux secondes, à la stratégie présentée dans [39], et aux deux approches présentées dans ce chapitre. On suppose dans la simulation que le véhicule suiveur et le véhicule leader circulent à une même vitesse constante et que les valeurs des taux de freinages sont  $B_{max1} = B_{max2} = 10m/s^2$ .

Les résultats démontrent les améliorations apportées à l'inter-distance de sécurité.

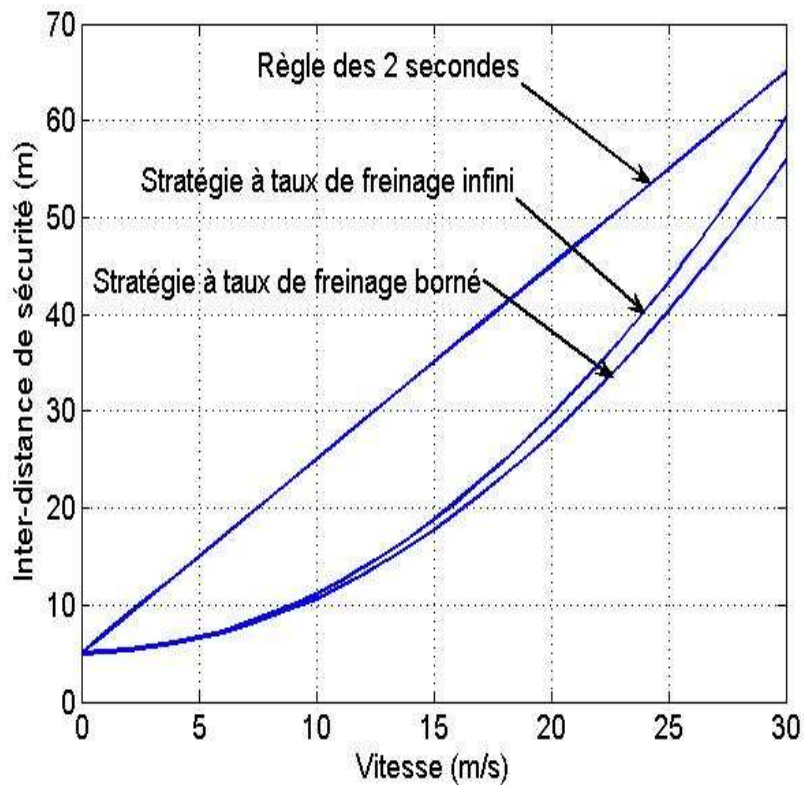


FIG. 2.23 – *Les stratégies de contrôle proposées conviennent contre les bouchons.*

## 2.7 Prise en compte de la condition initiale

Nous avons considéré dans le déroulement de cette étude qu'à l'instant initial, le système effectue une transition de l'état libre à l'état contraint (région sûre de la figure 2.24). Dans ce cas, nous avons montré que la stratégie est sûre. Toutefois, cette hypothèse (paragraphe 2.2.1) semble trop contraignante en situation réelle. En effet, si par exemple, le véhicule suiveur détecte le véhicule leader à la sortie d'un virage, il est possible que l'inter-distance entre les deux véhicules soit strictement inférieure à  $d_0$ . Dans ce cas, le véhicule suiveur se trouve dans la région dangereuse indiquée sur la figure 2.24; la transition de l'état libre à l'état contraint n'a pu être identifiée du fait de la mauvaise visibilité dans le virage.

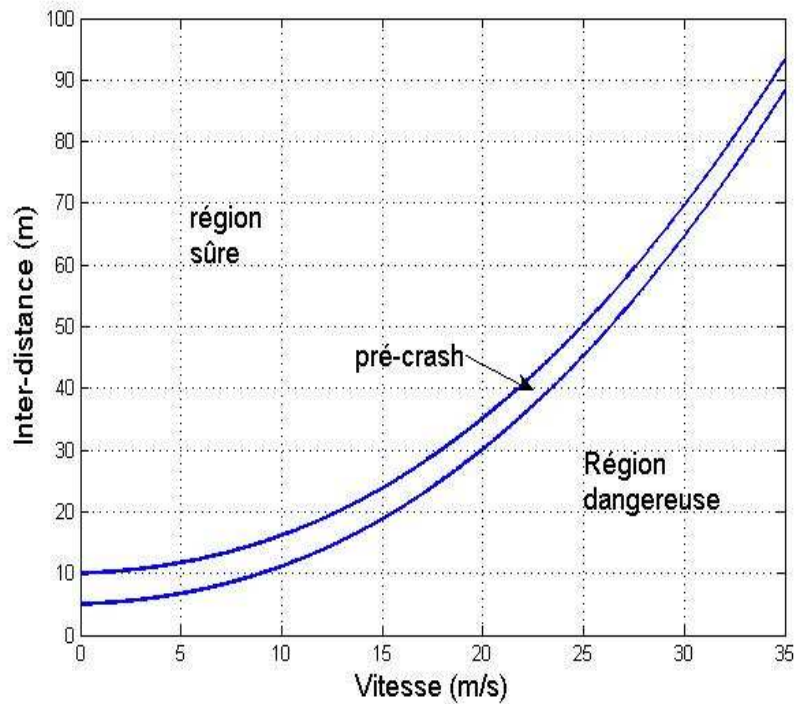


FIG. 2.24 – *Zones sûres et dangereuses pour la condition initiale,  $\alpha = 10m/s^2$ ,  $B_{max1} = 10m/s^2$ .*

Dans une telle situation, on choisit de faire subir au véhicule suiveur une décélération maximale  $B_{max1}$  pour ramener le système dans l'état libre, arrêter le véhicule suiveur au besoin ou réduire le plus possible l'énergie de l'impact avec le véhicule leader si une collision est inévitable.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau modèle de référence comme consigne d'asservissement de l'accélération. Cette consigne est employée par deux stratégies pour assurer une régulation de vitesse et d'inter-distance intelligente. Le modèle de référence est un modèle exponentiel du second ordre construit essentiellement sur la notion de distance de pénétration.

La première stratégie développée dans ce chapitre fait l'hypothèse que le véhicule leader, d'avec laquelle l'inter-distance doit être contrôlée, est capable de s'arrêter instantanément. Cette hypothèse, quoique a priori irréaliste, permet de s'affranchir complètement du comportement du véhicule leader et conduit à des solutions analytiques simples dans le développement des calculs. Cette approche est toutefois pénalisante par rapport aux situations réelles dans lesquelles les taux de freinage sont nécessairement finis.

La deuxième stratégie quant à elle, borne la capacité de freinage du véhicule leader par un taux maximal. De ce fait, elle permet, en intégrant cette donnée sur le leader, de

réduire l'inter-distance de sécurité nécessaire par rapport à la première stratégie.

Les inter-distances de sécurité induites par les deux approches sont faibles en comparaison avec celles issues de la règle classique des deux secondes et du modèle de Martinez. La deuxième approche améliore l'inter-distance de sécurité de la première approche notamment pour des vitesses élevées du véhicule leader.

Ces deux approches sont sûres vis-à-vis des collisions fronto-arrières pourvu qu'à la détection du leader la condition initiale  $d_r \geq d_0$  soit satisfaite. Le modèle de référence rend en plus les stratégies confortables et robustes.

Dans le cadre d'une implémentation réelle, il faut développer une boucle fermée de niveau supérieur pour garantir que la consigne proposée soit effectivement suivie.

# Chapitre 3

## Etude de la stabilité en chaîne

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>84</b>
<b>3.2</b>	<b>Formalisation du problème de stabilité en chaîne</b>	<b>85</b>
<b>3.3</b>	<b>Caractérisation des chaînes de véhicules</b>	<b>86</b>
<b>3.4</b>	<b>Stabilité en chaîne</b>	<b>88</b>
3.4.1	Stabilité en environnement uniforme	88
3.4.2	Stabilité en environnement mixte	89
3.4.3	Marge de stabilité d'une stratégie de référence	91
3.4.4	Marge de stabilité d'une sous-chaîne stable par rapport à une politique instable :	92
<b>3.5</b>	<b>Instabilité en chaîne de la conduite manuelle</b>	<b>92</b>
<b>3.6</b>	<b>Stabilité de la stratégie de contrôle longitudinal proposée au chapitre 2</b>	<b>95</b>
3.6.1	Stabilité en chaîne de la politique proposée en simulation	95
3.6.2	Influence de la stratégie dans un environnement mixte	99
<b>3.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>104</b>

---

### 3.1 Introduction

Les imperfections liées à la perception humaine dans un environnement de trafic routier induisent des retards considérables dans la transmission des signaux d'avertissement (feux de stop, de détresse, etc.). Ces retards sont source de nombreux accidents de la route. Certains travaux situent le temps de réaction du pilote humain entre 0.7 et 1.5 s. La quête d'une réduction maximale de ce retard a motivé des recherches passionnantes dans le secteur automobile et conduit à l'avènement des systèmes de transport intelligents. Au cours des dernières années, une multitude de ces technologies ont alimenté le marché des équipements automobiles et la majorité des véhicules de luxe en sont pourvus. Puisque la plupart de ces innovations ont vocation à gérer de façon sûre et confortable l'allure des véhicules, elles implémentent alors chacune une certaine politique d'inter-distance. Dès lors, on peut comprendre qu'il y a pratiquement autant de politiques d'inter-distance

mises en œuvre dans un trafic que de systèmes de gestion ACC différents. Cela suscite naturellement un intérêt pour l'étude de la stabilité en chaîne des files de véhicules contrôlés selon les politiques ACC proposées. On s'attend en effet à ce que ces politiques aient des impacts sur les caractéristiques du trafic routier de part le fait qu'elles ont une nature différente du comportement humain [64]. Une file (ou chaîne) de véhicules est un ensemble de véhicules se suivant en file indienne. La FIG.3.1 illustre une chaîne de trois véhicules.

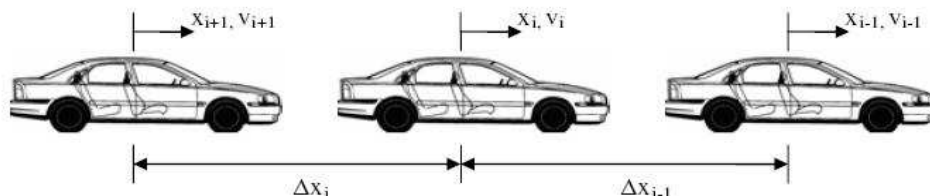


FIG. 3.1 – *Une chaîne de trois véhicules [75]*

La stabilité du trafic est une notion importante pour éviter une dispersion spatiale des véhicules du fait des fluctuations sur les vitesses des véhicules de la chaîne. La stabilité d'une chaîne de véhicules garantit que les inévitables variations qui entament l'allure d'un véhicule leader ne se traduisent en queue de chaîne par des écarts incontrôlés de l'inter-distance. Au contraire, il est convenable que tout écart sur le comportement du véhicule leader soit contenu, c'est-à-dire, amoindri ou tout au moins borné à mesure que la chaîne de véhicules en est traversée.

Dans ce chapitre, nous faisons une étude théorique de la stabilité en chaîne en environnements uniformes et mixtes.

- Dans un environnement uniforme, nous considérerons que les seuls véhicules qui interviennent dans la chaîne, à part éventuellement le leader, sont des véhicules ayant une même loi de contrôle de l'inter-distance.
- En environnement mixte, une diversité de véhicules contrôlés suivant différentes lois sera considérée.

Nous évaluons aussi les performances du modèle de référence proposé dans le chapitre 2 vis-à-vis de la notion de stabilité en chaîne. Une comparaison avec le comportement humain est réalisée et l'efficacité de la stratégie démontrée.

## 3.2 Formalisation du problème de stabilité en chaîne

Soit un ensemble de  $n$  véhicules circulant les uns à la suite des autres sur une même voie sans changement de file et sans dépassement. On se place dans un milieu non coopératif et donc un véhicule de la chaîne formée utilise les informations dynamiques de position, vitesse et éventuellement accélération seulement sur le véhicule qui le précède immédiatement. On suppose que chaque élément de la chaîne a une politique d'inter-distance associée bien définie. Alors, la dynamique d'un élément  $i$  de la chaîne peut s'exprimer de la manière suivante :

$$vehicule_i : \begin{cases} x_i = \frac{1}{s}v_i \\ v_i = G_i(s)v_{i-1} \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $x_i$  et  $v_i$  désignent dans cet ordre, la position et la vitesse du véhicule  $i$  et  $G_i$  représente sa politique de suivi longitudinale.

Soit  $D_i$  la distance de référence pour la politique d'inter-distance du véhicule  $i$ ,  $D_i$  sera donc l'inter-distance de suivi désirée. On peut alors définir pour chaque véhicule les erreurs suivantes :

$$\epsilon_i = x_{i-1} - x_i - D_i, \quad (3.2)$$

représentant l'erreur d'inter-distance et

$$\epsilon_{vi} = v_{i-1} - v_i, \quad (3.3)$$

représentant l'erreur de vitesse.

L'étude de la stabilité va consister à évaluer la manière dont se fait la propagation de ces erreurs de l'avant vers l'arrière de la chaîne. Pour cela, on définit la fonction de transfert d'erreur entre les véhicules d'indices  $i$  et  $i+k$  de la manière suivante :

$$G_{i,k} = \frac{\epsilon_{i+k}}{\epsilon_i} \quad (3.4)$$

### 3.3 Caractérisation des chaînes de véhicules

Dans cette partie, nous établissons l'expression générale de la fonction de transfert pour une chaîne de véhicules donnée. Nous ne faisons aucune hypothèse sur la politique d'inter-distance ; cette étude reste donc la plus générale possible pour être valide aussi bien sur les politiques de commande linéaires que non linéaires.

Dans un premier temps, nous évaluons la fonction de transfert de l'erreur entre deux véhicules successifs, soit  $G_{i,1}$  :

$$G_{i,1} = \frac{\epsilon_{i+1}}{\epsilon_i} = \frac{x_i - x_{i+1} - D_{i+1}}{x_{i-1} - x_i - D_i} \quad (3.5)$$

En utilisant 3.1, cette écriture devient :

$$G_{i,1} = \frac{\frac{1}{s}v_i - \frac{1}{s}G_{i+1}v_i - D_{i+1}}{\frac{1}{s}\frac{v_i}{G_i} - \frac{1}{s}v_i - D_i} \quad (3.6)$$



soit :

$$G_{i,1} = G_i \frac{1 - G_{i+1} - s \frac{D_{i+1}}{v_i}}{1 - G_i - s G_i \frac{D_i}{v_i}} \quad (3.7)$$

En écrivant :

$$\frac{D_{i+1}}{v_i} = \frac{D_{i+1}}{v_{i+1}} \frac{v_{i+1}}{v_i} \quad (3.8)$$

et en posant

$$R_i = \frac{D_i}{v_i}, \quad (3.9)$$

on obtient finalement :

$$G_{i,1} = G_i \frac{1 - G_{i+1}(1 + sR_{i+1})}{1 - G_i(1 + sR_i)} \quad (3.10)$$

Dans la suite, nous nous employons à étudier la fonction de transfert de l'erreur entre un véhicule  $i$  et le véhicule d'indice  $i + k$ . Nous notons la fonction de transfert  $G_{i,k}$ . On a :

$$G_{i,k} = \frac{\epsilon_{i+k}}{\epsilon_i} = \frac{x_{i+k-1} - x_{i+k} - D_{i+k}}{x_{i-1} - x_i - D_i} \quad (3.11)$$

En procédant comme précédemment, on obtient :

$$G_{i,k} = \frac{\frac{1}{s}v_{i+k-1} - \frac{1}{s}G_{i+k}v_{i+k-1} - D_{i+k}}{\frac{1}{s}\frac{v_i}{G_i} - \frac{1}{s}v_i - D_i} \quad (3.12)$$

En écrivant

$$v_{i+k-1} = G_{i+k-1}v_{i+k-2} = G_{i+k-1}G_{i+k-2}\dots G_{i+1}v_i, \quad (3.13)$$

on obtient :

$$G_{i,k} = \frac{\frac{1}{s}G_{i+k-1}G_{i+k-2}\dots G_{i+1}v_i - \frac{1}{s}G_{i+k}G_{i+k-1}\dots G_{i+1}v_i - D_{i+k}}{\frac{1}{s}\frac{v_i}{G_i} - \frac{1}{s}v_i - D_i}, \quad (3.14)$$

$$G_{i,k} = G_i \frac{G_{i+1}G_{i+2}\dots G_{i+k-1}(1 - G_{i+k}) - s \frac{D_{i+k}}{v_i}}{1 - G_i - s G_i \frac{D_i}{v_i}} \quad (3.15)$$

En, écrivant :

$$\frac{D_{i+k}}{v_i} = \frac{D_{i+k}}{v_{i+k}} \frac{v_{i+k}}{v_{i+k-1}} \frac{v_{i+k-1}}{v_{i+k-2}} \dots \frac{v_{i+1}}{v_i} = R_{i+k} G_{i+k} G_{i+k-1} \dots G_{i+1}, \quad (3.16)$$

on obtient finalement la relation suivante :

$$G_{i,k} = G_i G_{i+1} \dots G_{i+k-1} \frac{1 - G_{i+k}(1 + sR_{i+k})}{1 - G_i(1 + sR_i)} \quad (3.17)$$

La relation 3.17 décrit la fonction de transfert de la propagation de l'erreur de positionnement entre les véhicules d'indices  $i$  et  $i + k$  de la chaîne. Dans les cas où la norme infinie  $\|\cdot\|_\infty$  de cette fonction est accessible, l'étude de la stabilité se trouve facilitée par une simple comparaison de cette norme à 1 comme cela sera expliqué dans la section suivante.

## 3.4 Stabilité en chaîne

### 3.4.1 Stabilité en environnement uniforme

Soit un convoi de véhicules contrôlés suivant une même politique d'inter-distance longitudinale. On a alors comme vu précédemment  $G_i = G$  et  $R_i = R$  pour tout  $i$ . Il y a stabilité en chaîne lorsque l'erreur d'inter-distance en sortie de la chaîne est inférieure ou égale à celle de son entrée. On assure ainsi que l'erreur ne croît pas indéfiniment. Il en vient cette définition mathématique couramment adoptée :

#### Définition 1 :

Une chaîne uniforme de véhicules est stable lorsque [63] :

$$\|\epsilon_{i+1}\|_2 \leq \|\epsilon_i\|_2 \quad (3.18)$$

Ainsi si l'on suppose que tous les véhicules du système sont gérés selon une même politique d'inter-distance on obtient en régime stationnaire  $G_i = G_{i+1} = \dots = G_{i+k}$  et  $R_i = R_{i+1} = \dots = R_{i+k}$  d'où les égalités :

$$\frac{\epsilon_{i+1}}{\epsilon_i} = G_{i,1} = G_i \frac{1 - G_{i+1}(1 + sR_{i+1})}{1 - G_i(1 + sR_i)} = G_i = G \quad (3.19)$$

et

$$\frac{\epsilon_{i+k}}{\epsilon_i} = G_{i,k} = G_i G_{i+1} \dots G_{i+k-1} \frac{1 - G_{i+k}(1 + sR_{i+k})}{1 - G_i(1 + sR_i)} = G_i^k = G^k \quad (3.20)$$

Plusieurs remarques importantes découlent des résultats précédents : la fonction de transfert de la propagation d'erreur dépend de la politique d'interdistance de tous les véhicules situés entre le véhicule d'indice  $i$  et le véhicule d'indice  $i + k$ . L'expression établie en 3.17 est tout aussi bien valide dans un environnement de politique d'inter-distance uniforme que dans un environnement de politiques d'inter-distance mixte. Dans le cas où on se place dans un milieu uniforme, pour que la stabilité en chaîne soit garantie, il faut et il suffit que la norme infinie de la politique de contrôle de l'inter-distance employée soit inférieure ou égale à 1.

En effet, puisque dans ces conditions  $G_{i,k} = G^k$ ,  $\|G_{i,k}\|_\infty \leq 1$  si et seulement si  $\|G\|_\infty \leq 1$ , on peut en conclure qu'en environnement uniforme, la politique de suivi longitudinal détermine à elle seule la propriété de stabilité de la chaîne.

### 3.4.2 Stabilité en environnement mixte

Dans un trafic routier normal, il n'y a évidemment pas une politique d'intervéhiculaire unique pour tous les usagers, bien au contraire, chaque véhicule a une politique propre. Même si on supposait le trafic exclusivement constitué de véhicules ACC, on sait trop bien que différentes politiques d'inter-distance gouvernent ces véhicules. L'analyse de la stabilité en environnement mixte est donc une nécessité. La complexité de ce cas repose non seulement sur la grande diversité des politiques de suivi mais aussi sur leurs propriétés de stabilité propre. En effet dans un tel trafic, certains véhicules seront gouvernés par des politiques d'inter-distance stables et d'autres au contraire par des politiques instables. Dans un tel contexte, la définition de la notion de stabilité en chaîne ne saurait être celle donnée dans la section précédente. Une nouvelle définition s'impose, qui respecte tout de même la contrainte de non amplification de l'erreur d'inter-distance.

Considérons ici une chaîne de référence de  $k$  véhicules mixtes indicés  $i = 1, \dots, i = k$ ,  $G_i$  étant comme dans les sections précédentes la politique de suivi longitudinale du véhicule  $i$ . Nous formons avec cette chaîne une chaîne supérieure de longueur infinie en répétant à l'identique et à l'infini la chaîne de référence, sous-chaîne de la chaîne obtenue. Les sous-chaînes sont indicées  $1, 2, \dots, n, n + 1, \dots$ . Nous considérons, pour définir la notion de stabilité de la chaîne de référence mixte finie, que si elle est stable, alors pour tout  $n$  la fonction de transfert de l'erreur d'inter-distance reste bornée entre le premier véhicule de la sous-chaîne  $C_n$  et celui de la sous-chaîne  $C_{n+1}$ .

D'après la construction même de la chaîne, un véhicule d'indice  $p$ ,  $1 \leq p \leq k$ , de la sous-chaîne  $C_n$  d'indice  $n$  aura l'indice  $nk + p$  dans la chaîne globale et on aura toujours :

$$G_{k(n+1)+p} = G_{kn+p} \quad (3.21)$$

La fonction de transfert d'erreur entre le premier véhicule d'une sous-chaîne  $C_n$  et le premier véhicule de la sous-chaîne  $C_{n+1}$  suivante est alors fournie par :

$$G_{nk+1,1} = \frac{\epsilon_{(n+1)k+1}}{\epsilon_{nk+1}} \quad (3.22)$$

soit,

$$G_{nk+1,1} = G_{nk+1}G_{nk+2}\dots G_{nk+k} \frac{1 - G_{(n+1)k+1}(1 + sR_{(n+1)k+1})}{1 - G_{nk+1}(1 + sR_{nk+1})} \quad (3.23)$$

D'après la relation (3.21), on peut écrire :

$$G_{nk+1} = G_{(n+1)k+1} = G_1, G_{nk+2} = G_{(n+1)k+2} = G_2, \dots, \quad G_{nk+k} = G_{(n+1)k+k} = G_k \quad (3.24)$$

De même on a :

$$R_{nk+1} = R_{(n+1)k+1} = R_1, R_{nk+2} = R_{(n+1)k+2} = R_2, \dots, \quad R_{nk+k} = R_{(n+1)k+k} = R_k \quad (3.25)$$

Il en vient donc la relation suivante :

$$G_{nk+1,k} = G_1G_2\dots G_k \quad (3.26)$$

Pour que la stabilité en chaîne soit assurée, il faut et il suffit que l'amplitude de  $G_{nk+1,k}$  soit inférieure ou égale à 1. Cela revient à dire qu'une chaîne mixte de  $k$  véhicules est stable si et seulement si  $\|G_1G_2\dots G_k\|_\infty \leq 1$  où  $G_i, i = 1\dots k$  désigne la politique d'inter-distance du véhicule  $i$  d'où la définition suivante de la stabilité pour une chaîne de véhicules mixte.

### Définition 2 :

Une chaîne mixte de  $k$  véhicules est stable si  $\|G_1G_2\dots G_k\|_\infty \leq 1$  où  $G_i, i = 1\dots k$ , désigne la politique d'inter-distance du véhicule  $i$ .

On voit dans les résultats de cette section que l'ordre dans lequel sont placés les véhicules de la chaîne n'a aucune incidence sur la stabilité de celle-ci. D'autre part si chaque véhicule de la chaîne a une politique d'inter-distance stable en chaîne alors la chaîne de véhicules mixte est stable puisqu'on a l'inégalité suivante qui est toujours vérifiée :

$$\|G_{i,k}\| = \|G_1G_2\dots G_k\|_\infty \leq \|G_1\|_\infty \|G_2\|_\infty \dots \|G_k\|_\infty \quad (3.27)$$

Soit à présent une chaîne quelconque de  $k$  véhicules contrôlés suivants  $r$  politiques de suivi longitudinales,  $r \leq k$ , et soit pour  $G_j, j = 1\dots r$  les fonctions de transfert des politiques intervenant. Soit  $r_j$ , le nombre de véhicules de la chaîne gouvernée selon la stratégie  $G_j$ , la fonction de transfert de l'ensemble de la chaîne  $G$  s'exprime comme suit :

$$G = \prod_{j=1}^r G_j^{r_j}, \quad (3.28)$$

avec

$$\sum_{j=1}^r r_j = k \quad (3.29)$$

Soit la distribution de probabilité  $P(\cdot)$  qui associe à chaque stratégie  $j$ , sur un ensemble de  $k$  véhicules, les probabilités associées au nombre  $r_j$  de véhicules pour la politique  $G_j$ . On peut alors caractériser l'espérance mathématique du nombre de véhicules de chaque stratégie et l'écrire comme suit :

$$\bar{r}_j = \sum_{r_j=1}^k r_j P(r_j) \quad (3.30)$$

La fonction de transfert de l'ensemble de la chaîne dans l'espace probabilisé décrit ci-dessus s'écrit alors :

$$G = \prod_{j=1}^r G_j^{\bar{r}_j}, \quad (3.31)$$

### 3.4.3 Marge de stabilité d'une stratégie de référence

Dans [63], la notion de marge de stabilité est définie pour une stratégie ACC dans un environnement où la mixité se restreint strictement au mélange de véhicules manuels et de véhicules pilotés selon la stratégie ACC en question. Dans ce cadre, pour une chaîne mixte de  $n$  véhicules manuels et un seul véhicule ACC, la marge de stabilité représente le nombre maximum de véhicules manuels dans la chaîne pour lequel la stabilité de l'ensemble reste garantie. En notant  $G_M$  la politique de suivi longitudinale des véhicules manuels et  $G_{ACC}$  celle du véhicule ACC, la marge de stabilité  $m$  est définie telle que :

$$m : \begin{cases} \|G_M^m G_{ACC}\|_{\infty} \leq 1 \\ \|G_M^{m+1} G_{ACC}\|_{\infty} > 1 \end{cases} \quad (3.32)$$

Ici, nous introduisons une définition plus générale de la notion de marge de stabilité. Il semble plus convenable en effet que la notion de marge de stabilité d'une politique d'inter-distance  $G_{ref}$  donnée soit relative à une politique d'inter-distance instable  $G_{ins}$  donnée puisqu'on peut théoriquement imaginer un trafic mixte avec seulement des véhicules ACC implémentant des politiques de gestion d'inter-distance différentes. En considérant donc une chaîne mixte composée de véhicules gouvernés selon deux stratégies de commande longitudinale, on définit la marge de stabilité relative de la politique  $G_{ref}$  par rapport à la politique  $G_{ins}$  de la manière suivante :

**Définition 3 (Marge de stabilité relative d'une stratégie stable) :**

La marge de stabilité relative d'une politique d'inter-distance stable  $G_{ref}$  par rapport à une politique d'inter-distance instable  $G_{ins}$  donnée est le nombre  $m$  de véhicules gérés suivant  $G_{ins}$  dont l'instabilité peut être corrigé par un seul véhicule piloté selon  $G_{ref}$ . En d'autres termes, c'est le nombre  $m$  tel que :

$$m : \begin{cases} \|G_{ins}^m G_{ref}\|_{\infty} \leq 1 \\ \|G_{ins}^{m+1} G_{ref}\|_{\infty} > 1 \end{cases} \quad (3.33)$$

**Remarque :** Il est clair que, puisque deux politiques de commande longitudinale distinctes auront des fonctions de transfert associées différentes, les marges de stabilité d'une même politique d'inter-distance stable par rapport à des stratégies de contrôle d'inter-distances instables différentes seront a priori différentes. C'est d'ailleurs là l'intérêt de cette définition.

La notion de marge de stabilité permet de comparer l'efficacité du point de vue de la stabilité, de différentes politiques d'inter-distance. En effet, si l'on considère deux stratégies de contrôle stables différentes et que l'on évalue leurs marges de stabilité par rapport à une même politique instable, la stratégie de plus grande marge est plus stable. De même si pour une même stratégie stable on évalue la marge de stabilité relative pour des politiques d'inter-distances instables différentes, celles-ci seront considérées d'autant plus instables que les marges de stabilité qui leur correspondront seront faibles.

**3.4.4 Marge de stabilité d'une sous-chaîne stable par rapport à une politique instable :**

On peut également définir la marge de stabilité relative d'une sous-chaîne stable par rapport à une stratégie ou même une sous-chaîne instable. Il suffit pour cela de considérer pour chaque sous-chaîne, une fonction de transfert selon l'équation 3.26.

Soient deux stratégies de contrôle d'inter-distance  $S_1$  et  $S_2$ , de fonctions de transfert associées  $G_1$  et  $G_2$ , telles que  $S_1$  est stable en chaîne et  $S_2$  instable en chaîne. On a alors  $\|G_1\|_{\infty} \leq 1$  et  $\|G_2\|_{\infty} > 1$ . Si  $m$  est la marge de stabilité de  $S_1$  par rapport à  $S_2$  avec  $\|G_1\|_{\infty} \|G_2\|_{\infty}^m \leq 1$  alors une sous-chaîne de  $p$  véhicules contrôlés suivant  $S_1$  a une marge de stabilité au moins égal à  $mp$  par rapport à  $S_2$ .

En effet on a alors :

$$\|G_1^p G_2^{mp}\|_{\infty} \leq \|G_1 G_2^m\|_{\infty}^p \leq \|G_1\|_{\infty}^p \|G_2\|_{\infty}^{mp} \leq 1 \quad (3.34)$$

**3.5 Instabilité en chaîne de la conduite manuelle**

Dans cette partie, nous montrons l'instabilité en chaîne des véhicules manuels. Pour ce faire, nous considérons comme politique de contrôle d'inter-distance manuelle, le modèle proposé par Chandler pour sa simplicité (voir [63]). Cette stratégie sera employée

pour simuler une chaîne de véhicules manuels. Le modèle de Chandler s'exprime selon la relation suivante :

$$\dot{v}_i(t) = \frac{\lambda}{M}[v_{i-1}(t - \Delta) - v_i(t - \Delta)], \quad (3.35)$$

Dans cette expression,  $\lambda$  désigne la sensibilité du mécanisme de contrôle,  $M$ , la masse du véhicule contrôlé et  $\Delta$ , le temps de réaction conducteur. Ce modèle exprime en fait l'accélération à l'instant  $t$  du véhicule piloté comme une grandeur proportionnelle à la vitesse relative entre ce dernier et le véhicule qui le précède à l'instant  $t - \Delta$ . Chandler évalue dans ses travaux, la valeur moyenne du paramètre  $\lambda$  à 0.368 s et le temps de réaction moyen des conducteurs à 1.55 s. La fonction de transfert d'une telle politique s'exprime comme suit :

$$G_H = \frac{v_i}{v_{i-1}} = \frac{0.368e^{-1.55s}}{s + 0.368e^{-1.55s}}, \quad (3.36)$$

On montre aisément que :

$$\|G_H\|_\infty > 1, \quad (3.37)$$

ce qui achève de démontrer l'instabilité en chaîne de la stratégie.

Afin d'illustrer cette instabilité, nous avons simulé sous Matlab une chaîne de  $n = 31$  véhicules manuels suivant la politique de Chandler. Ces véhicules sont supposés se suivre en file indienne sur une route à une seule voie, sans possibilité de dépassement. Chaque véhicule est supposé rouler à la vitesse initiale constante de  $30m/s$  lorsque la vitesse  $v_0$  du véhicule leader vient à être affectée par une perturbation. On considère dans les simulations que la perturbation consiste en une variation de vitesse de  $30m/s$  à  $33m/s$  à l'accélération constante de  $1m/s^2$  suivie dix secondes plus tard d'une décélération à  $1m/s^2$  qui ramène  $v_0$  à la vitesse de référence de  $30m/s$ .

Les FIG.3.2 et FIG.3.3 illustrent alors l'instabilité de la politique de contrôle manuel. Dans la FIG.3.2, on considère que tous les conducteurs ont le même temps de réaction de 1.55 s tandis que dans la FIG.3.3 le temps de réaction de chaque conducteur est choisi de manière aléatoire, uniformément entre 1 et 2 s. Dans chaque cas, on s'aperçoit clairement que la perturbation induite sur la vitesse du véhicule leader, s'amplifie à mesure qu'elle gagne les véhicules en queue de chaîne. Même si dans la simulation à temps de réaction aléatoire, on se rend compte que cette perturbation peut venir à décroître localement entre deux véhicules, l'allure globale montre une instabilité irréfutable. Cette remarque permet néanmoins de comprendre que l'instabilité constatée est due à l'importance du temps de réaction du conducteur et que si celui-ci baissait, la conduite manuelle serait plus stable.

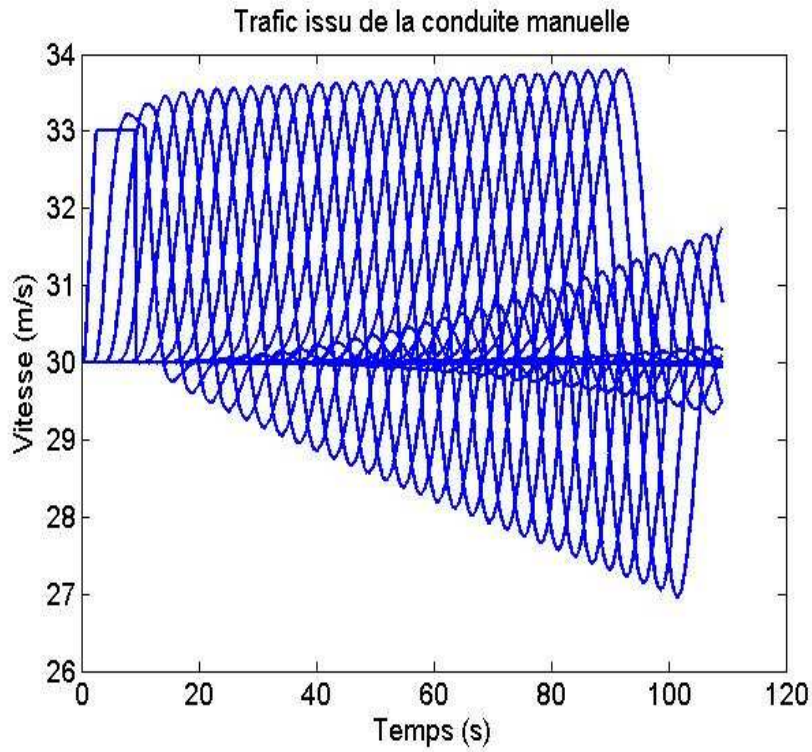


FIG. 3.2 – *Instabilité de la conduite manuelle : temps de réaction identiques*

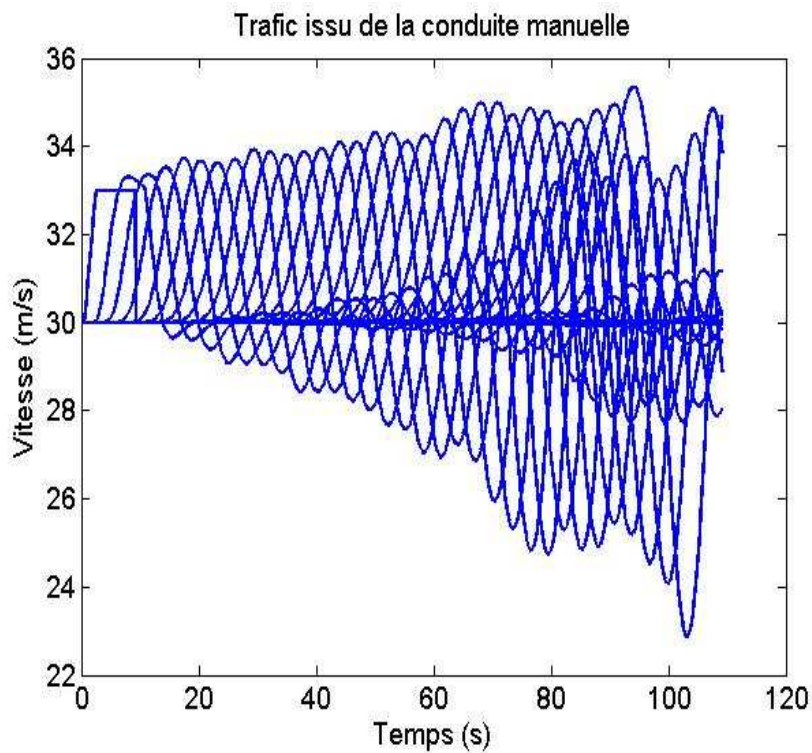


FIG. 3.3 – *Instabilité de la conduite manuelle : temps de réaction aléatoires*

La perturbation sur la vitesse du véhicule leader entraîne également un effet oscil-



latoire croissant autour de la vitesse de référence de  $30\text{m/s}$  sur le profil de vitesse des véhicules suiveurs. Cet effet est mis en évidence sur la FIG.3.4 et témoigne d'une conduite peu confortable.

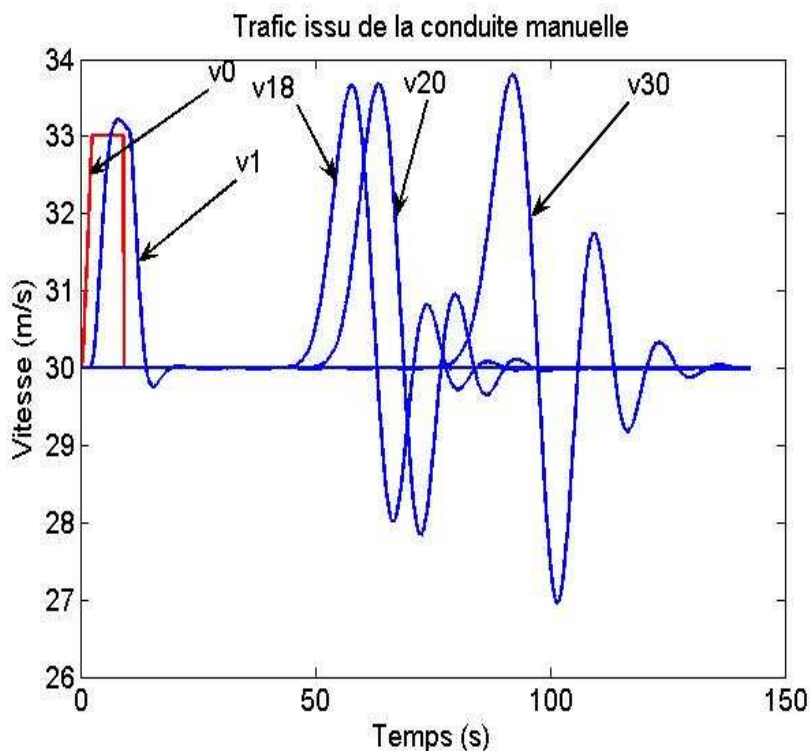


FIG. 3.4 – *Effet oscillatoire induite par la perturbation*

### 3.6 Stabilité de la stratégie de contrôle longitudinal proposée au chapitre 2

Dans cette partie nous étudions la stabilité de la stratégie de contrôle longitudinal présentée au chapitre précédent et faisant l'hypothèse d'un taux de freinage infini du véhicule leader. Contrairement à la plupart des travaux menés sur la stabilité en chaîne de véhicules, la politique de gestion est ici non linéaire et même fortement non linéaire ce qui ne permet pas de disposer d'une expression explicite de la fonction de transfert, ni d'accéder à la norme infinie de celle-ci. Par conséquent, la marge de stabilité sera évaluée dans un cas particulier de perturbation et la valeur de la marge alors obtenue ne saurait être qu'un majorant de la marge de stabilité réelle de la politique. La politique instable par rapport à laquelle cette "marge" sera évaluée sera la conduite manuelle sans assistance car celle-ci reste de loin la plus utilisée.

#### 3.6.1 Stabilité en chaîne de la politique proposée en simulation

Nous avons implémenté sous Matlab, la même simulation que celle décrite dans la section précédente, à la différence que la politique d'inter-distance entre véhicules, dans

cette section, est basée sur la stratégie de contrôle longitudinal présentée au chapitre précédent (equation 2.1). Dans la simulation  $\alpha = 10m/s^2$ , et est lié à  $c$  par la relation d'optimisation définie dans l'équation 2.10. Le taux de freinage maximal du véhicule suiveur est fixé à  $B_{max} = 10m/s^2$ . La simulation montre que la perturbation sur la vitesse du véhicule leader est atténuée de manière exponentielle vers les véhicules reculés de la chaîne. Cela est bien illustré par la FIG.3.5. D'autre part, l'effet oscillatoire observé dans le cas de la conduite manuelle a complètement disparu comme le montre la FIG.3.6

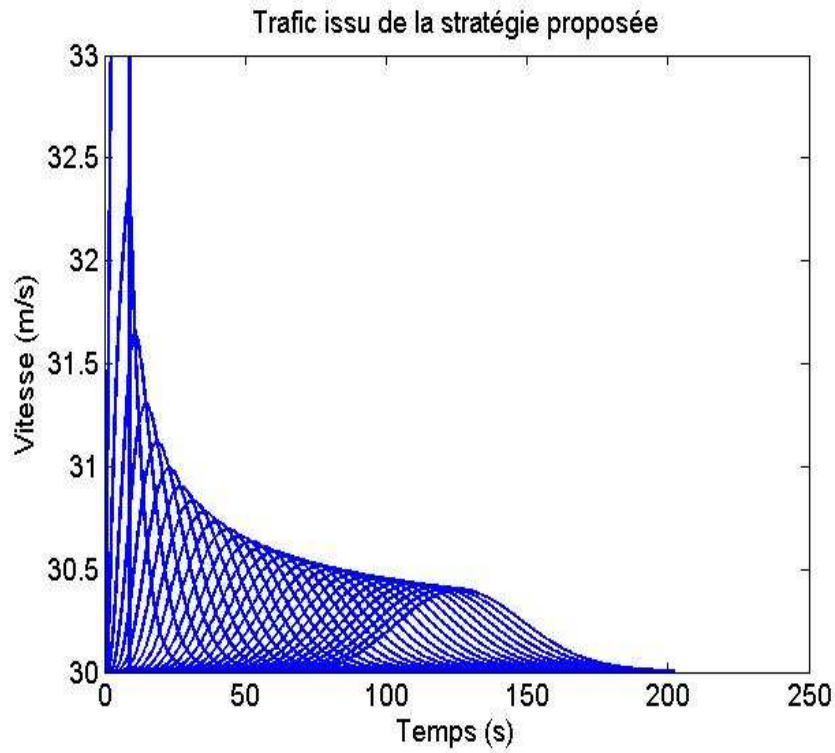


FIG. 3.5 – *Stabilité de la politique ACC proposée pour la perturbation*

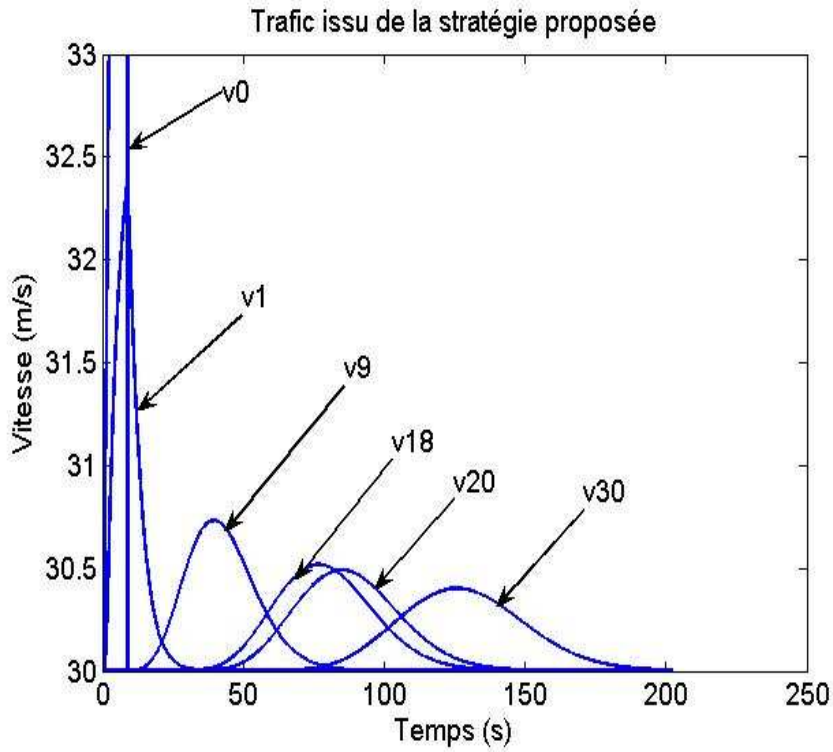


FIG. 3.6 – *Une conduite sans oscillations*

De même en considérant un scénario dans lequel le véhicule leader roulant initialement à la vitesse de  $25\text{m/s}$  ralentit jusqu'à la vitesse de  $20\text{m/s}$  qu'il maintient pendant 15 secondes avant d'accélérer à nouveau jusqu'à la vitesse de  $25\text{m/s}$ , la conduite manuelle se montre instable et fluctuante tandis qu'un contrôle selon la stratégie proposée au chapitre 2 se montre stable et annihile toute fluctuation. Les FIG.3.7 et FIG.3.8 illustrent ces résultats.

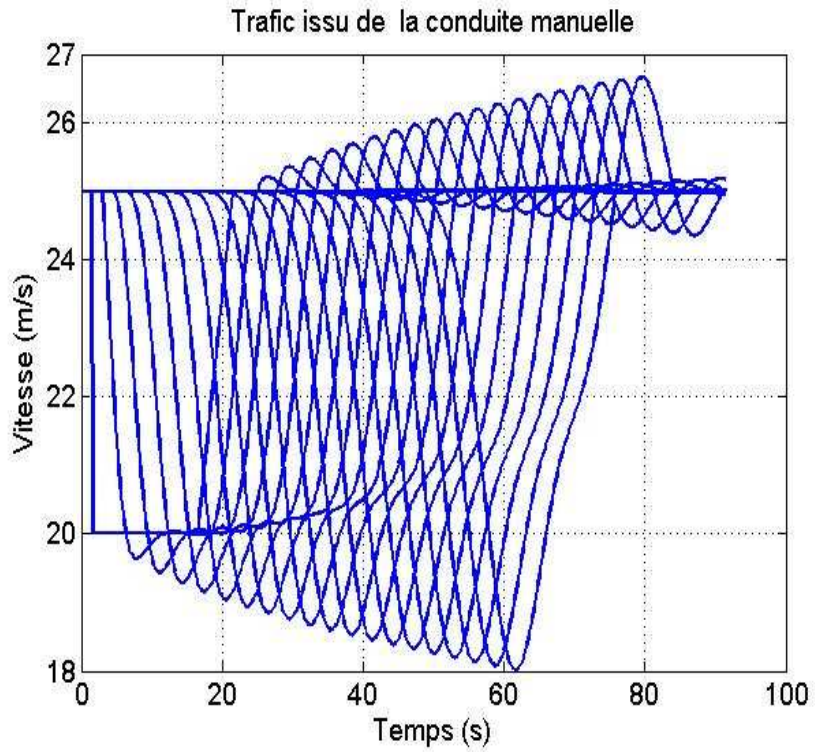


FIG. 3.7 – *Instabilité de la conduite manuelle*

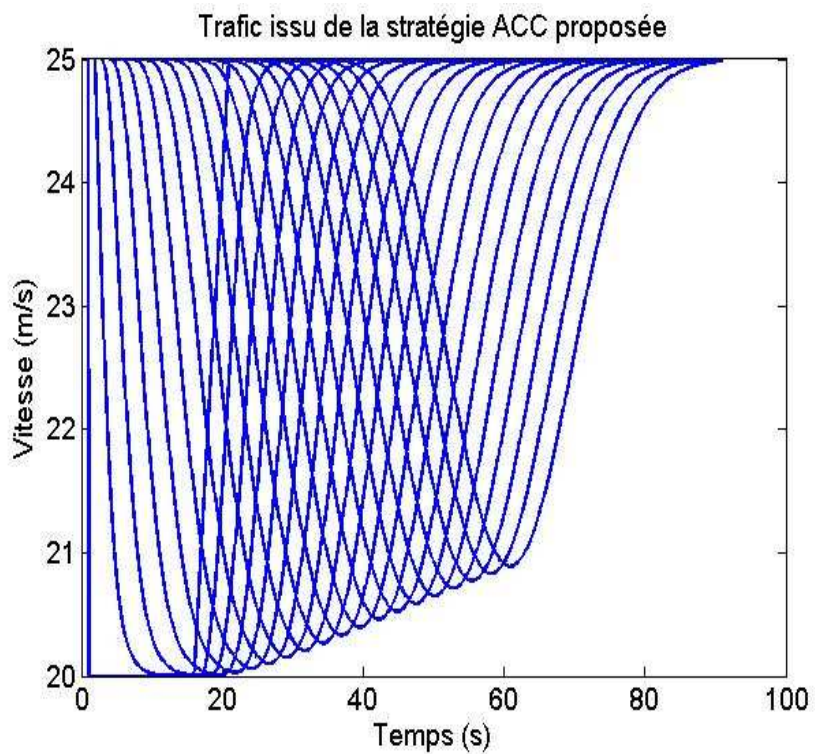


FIG. 3.8 – *La stratégie ACC maintient la chaîne sable*

Dans la suite, on s'applique à étudier l'apport de la stratégie de commande proposée

dans un environnement mixte. Par souci de simplicité, l'environnement mixte sera supposé composé uniquement de véhicules ACC pilotés selon la stratégie offerte et de véhicules manuels suivant le modèle de Chandler présenté dans la section 3.5.

### 3.6.2 Influence de la stratégie dans un environnement mixte

Dans cette section, nous considérons une chaîne de véhicules ACC suivant la stratégie proposée (avec les mêmes paramètres que dans la section précédente) et de véhicules manuels. Sachant déjà que les chaînes de véhicules manuels sont instables, nous allons analyser l'impact des véhicules ACC sur la stabilité de l'ensemble et déterminer pour les perturbations précédemment introduites, la limite du pouvoir correcteur de ces véhicules ACC vis-à-vis de l'instabilité des véhicules manuels.

A cette fin, nous simulons sur la FIG.3.9 une chaîne de  $n = 101$  véhicules dont 25 véhicules ACC régulièrement placés 4, 8, 12,...100 et séparés par des véhicules manuels suivant le modèle de Chandler. Sur la FIG.3.10, la chaîne de 101 véhicules comprend 24 véhicules ACC positionnés de manière aléatoire dans la chaîne. On peut donc considérer que dans chaque cas, le taux d'introduction des véhicules ACC est d'environ 25%. En partant d'une condition initiale telle que chaque véhicule roule à la vitesse de référence de  $30m/s$ , on introduit la même perturbation que dans les sections précédentes, sur la vitesse du véhicule leader.

D'après les FIG.3.9 et FIG.3.10, la stabilité de l'ensemble de la chaîne est évidente. L'inconfort de l'effet oscillatoire dû à la conduite manuelle est également presque inexistant. En considérant le nombre relativement faible de véhicules ACC dans la chaîne (25%), on devine que la stratégie proposée est suffisamment stable pour anihiler l'instabilité propre de la conduite manuelle sans assistance.

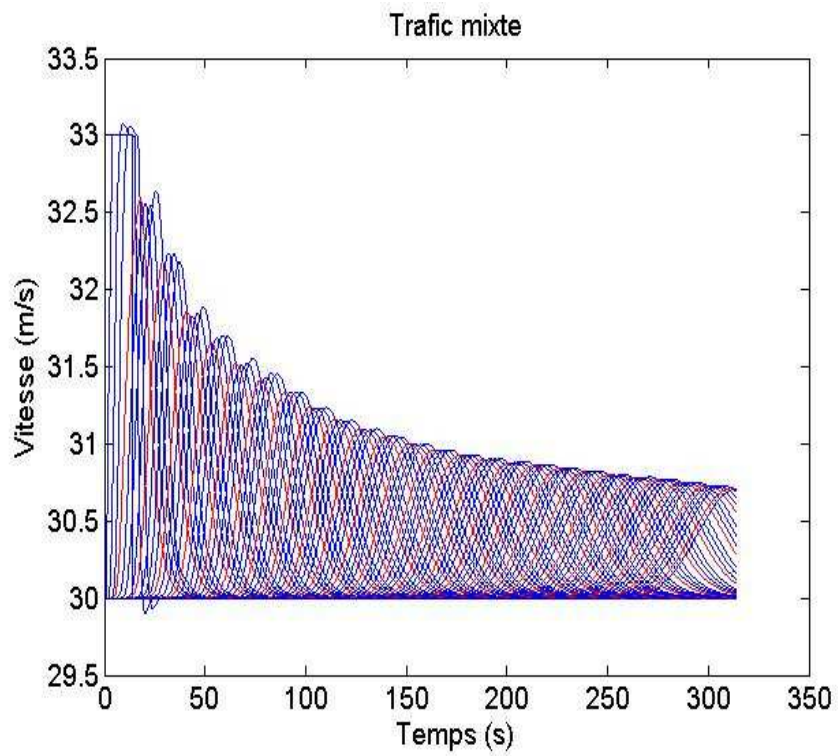


FIG. 3.9 – *Résistance à la perturbation d'un environnement mixte, ACC régulièrement disposés,  $n=101$  véhicules*

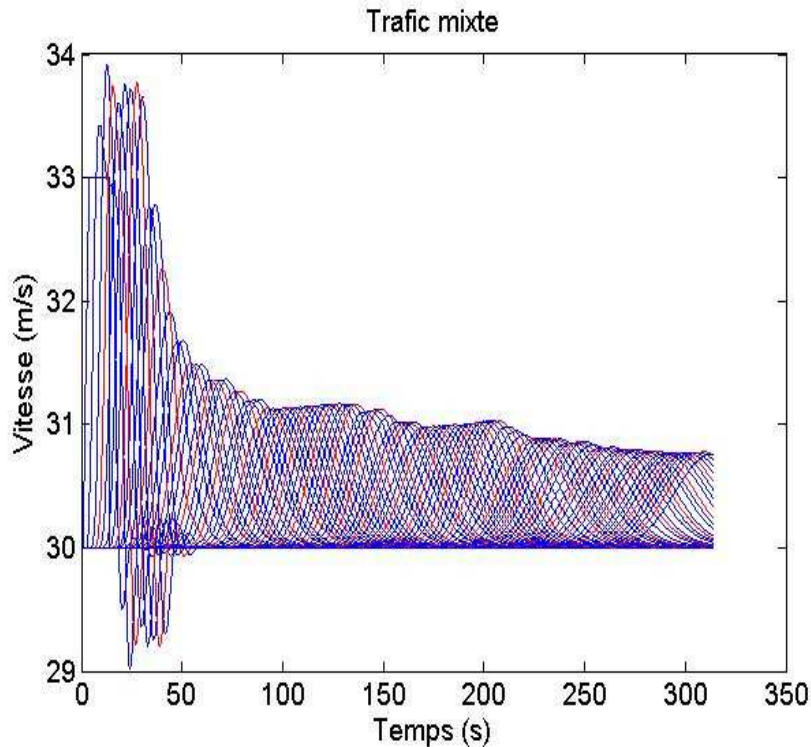


FIG. 3.10 – *Résistance à la perturbation d'un environnement mixte, ACC aléatoirement disposés,  $n=101$  véhicules*

D'après les résultats obtenus précédemment, il suffit que le quart du trafic mixte soit ACC pour que la stabilité en bout de chaîne soit garantie. Il est alors bien légitime de se poser la question de savoir à quel point ce taux peut être diminué tout en maintenant le système stable. En d'autres termes, que vaut la marge de stabilité de la stratégie dans l'environnement mixte pour la perturbation décrite ?

Lorsque la politique de contrôle est linéaire, on peut parfois déterminer de manière absolue la valeur de la marge de stabilité (voir [63]). Pour notre part, nous procédons par simulation étant entendu qu'une approche mathématique semble bien inaccessible du fait de la complexité et des non linéarités du système. Aussi, considérons-nous une chaîne de véhicules mixte comprenant un seul véhicule ACC piloté selon la stratégie proposée. Les autres véhicules de la chaîne sont manuels. Dans la simulation, nous supposons que le véhicule ACC est le dernier de la chaîne (cela n'est pas déterminant en fait pour la stabilité). La procédure consiste à augmenter progressivement dans la chaîne, le nombre de véhicules manuels jusqu'à ce que le système bascule dans l'instabilité. La marge de stabilité correspond alors au nombre de véhicules manuels avant le basculement.

Nous montrons ainsi que la marge de stabilité pour la première perturbation vaut 19. La FIG.3.11 illustre bien ce résultat et on en conclut qu'un taux de présence de 5% de véhicules ACC pilotés selon la stratégie proposée suffirait en fait à stabiliser un trafic mixte pour cette perturbation. La marge ainsi obtenue est un majorant de la marge de stabilité de la stratégie par rapport au modèle de Chandler. Dans la FIG.3.12 nous avons considéré une chaîne mixte de 401 véhicules dans laquelle les véhicules ACC sont



régulièrement disposés, chaque véhicule ACC étant précédé de 19 véhicules manuels. On vérifie bien que le système est stable.

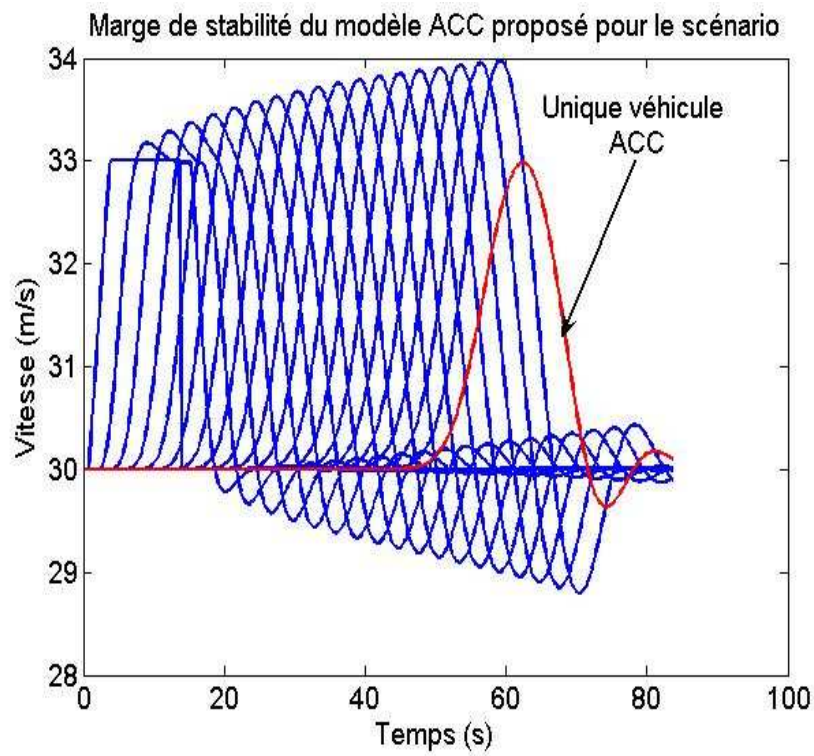


FIG. 3.11 – *Marge de stabilité pour la perturbation décrite*



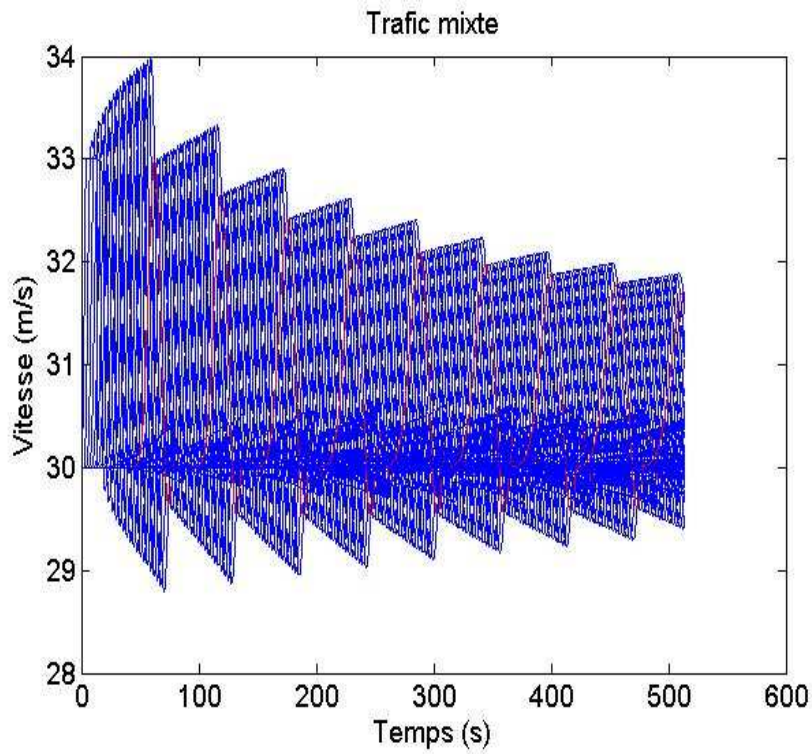


FIG. 3.12 – *Stabilité d'un trafic mixte à la limite de la marge de stabilité*

On peut évaluer de la même manière la marge de stabilité en chaîne de la stratégie vis-à-vis de la conduite manuelle, pour la deuxième perturbation. La marge est bien moins importante mais vaut tout de même 4, ce qui indique que si 25% des véhicules de la chaîne suivent la stratégie proposée, la chaîne sera stable vis-à-vis de cette perturbation. La FIG.3.13 illustre le résultat.

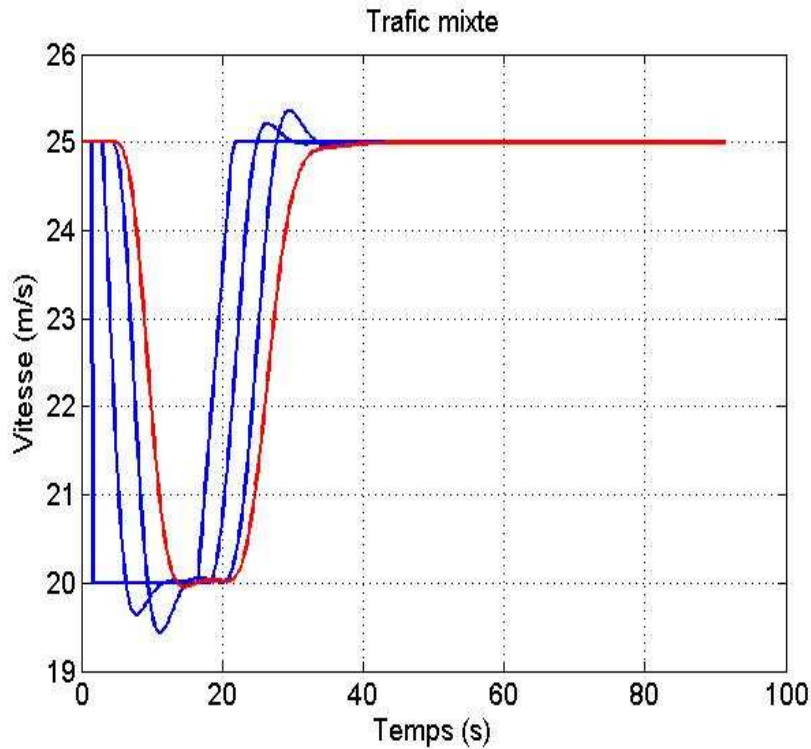


FIG. 3.13 – *Marge pour la seconde perturbation*

On constate donc que même si dans chacun de ces cas de perturbation, la stabilité en chaîne demeure assurée, la marge diffère fortement de l'un à l'autre cas. Cela est dû au fait que nous avons évalué une marge de stabilité relative à une perturbation, la marge de stabilité absolue demeurant inaccessible du fait de la non linéarité de la stratégie.

### 3.7 Conclusion

La pluralité des politiques d'inter-distance nécessite que l'on s'intéresse à la stabilité des trafics qu'elles génèrent. En effet, si les stratégies d'inter-distance sont conçues pour garantir un certain niveau de sécurité et de confort, leur influence sur la stabilité du trafic est rarement analysé.

Dans ce chapitre, nous avons établi des résultats généraux sur la stabilité en chaîne de véhicules conduits selon des politiques d'inter-distance quelconques en environnement mixte et introduit la notion de stabilité relative à une perturbation donnée pour tenir compte du cas des politiques de gestion d'inter-distance non linéaires pour lesquelles on n'est ni capable de déterminer une fonction de transfert, ni de déterminer ce qui pourrait être l'équivalent d'une norme infinie pour ces fonctions. Une analyse de la stabilité de la politique d'inter-distance présentée au chapitre 2 et faisant l'hypothèse d'une capacité de freinage infinie du véhicule leader a été effectuée et comparée à la stabilité d'une chaîne de véhicules manuels selon le modèle de Chandler. Pour les perturbations étudiées, la politique d'inter-distance proposée est stable en chaîne d'après les résultats de simulation et des marges de stabilité relative importantes ont été obtenues vis-à-vis du modèle instable

de Chandler pour lesdites perturbations, et ce, alors même que cette politique n'a pas été conçue à l'origine selon les critères de stabilité en chaîne mais plutôt de sécurité et de confort. Toutefois, la politique proposée étant fortement non linéaire, une comparaison avec d'autres approches ne peut être valable que pour des perturbations données. Mais vu son comportement vis-a-vis des perturbations étudiées on peut penser que la politique proposée restera stable pour d'autres perturbations.

# Chapitre 4

## Identification de scénarios par dépointage du faisceau de l'antenne radar

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>106</b>
<b>4.2</b>	<b>Hypothèses générales</b>	<b>107</b>
<b>4.3</b>	<b>Scénarios de trafic sur route droite</b>	<b>108</b>
4.3.1	Extraction de données pertinentes	108
4.3.2	Identification des scénarios	111
<b>4.4</b>	<b>Scénarios de trafic sur routes courbes</b>	<b>111</b>
4.4.1	Bénéfice du dépointage du faisceau d'antenne sur la visibilité- Détection du véhicule cible sur la voie du véhicule contrôlé . . .	111
4.4.2	Détection du véhicule cible sur une voie quelconque . . . . .	114
4.4.3	Identification des scénarios . . . . .	115
<b>4.5</b>	<b>Evaluation de la distribution de SER</b>	<b>117</b>
4.5.1	Estimation de la distribution de SER par simulation . . . . .	117
4.5.2	Procédure de mesure de la distribution de SER . . . . .	119
4.5.3	Résultats des mesures de la distribution de SER . . . . .	120
4.5.4	Apports du dépointage dans la détection radar . . . . .	122
<b>4.6</b>	<b>Apports potentiels du dépointage de faisceau d'antenne dans les stratégies proposées</b>	<b>128</b>
4.6.1	Apports sur la stratégie à taux de freinage infini . . . . .	128
4.6.2	Apports sur la stratégie à taux de freinage fini . . . . .	130
<b>4.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>130</b>

---

### 4.1 Introduction

L'intelligence de l'homme repose en partie sur sa capacité à entreprendre des actions appropriées sur la base d'informations plus ou moins riches et variées. Un système de collecte d'informations lui est donc indispensable : c'est le rôle que jouent les organes

de sens tels que les yeux. Une imitation de ce modèle permet la conception de systèmes technologiques de plus en plus performants. De plus en plus d'outils évolués intègrent un module de perception. Il s'agit de les doter d'une source de renseignements qui participe de leur intelligence. Les systèmes dits intelligents se doivent en effet de pouvoir prendre un minimum de décisions sans intervention humaine. Ainsi, lorsque l'information nécessaire à la prise de décision porte sur l'environnement physique du système, un outil de détection est indispensable. De nombreuses technologies ont été employées jusque-là pour garantir une détection distante d'objets divers. Les systèmes radar, radar-laser [76], lidar [4], caméra [4, 16, 17] font partie de ces solutions. Dans les années 1960 et 1970 les chercheurs de Ford Motor, General Motors et de l'université de Michigan furent les premiers à publier sur des concepts nouveaux de perception dans le domaine de l'automobile [77].

Dans un système de gestion d'inter-distance, le rôle des technologies de la perception est primordial dans la mesure où celles-ci constituent la source des informations disponibles sur l'environnement, et à partir desquelles sont prises les décisions appropriées sur la dynamique asservie du véhicule. La plupart du temps, les informations que l'on extrait de ces systèmes concernent la position, la vitesse et l'accélération des cibles dans l'environnement du véhicule contrôlé. Dans les systèmes radar, les décalages temporel et fréquentiel du signal retour par rapport au signal émis servent à extraire l'essentiel de ces informations.

Du fait de leur robustesse aux perturbations météorologiques, les radars sont les plus usités de tous les systèmes de perception pour les applications à la conduite intelligente. Les systèmes actuels pour l'automobile sont conçus pour fonctionner dans la bande 76-77 GHz [15, 77-80]. En général, les implémentations ACC utilisent des radars fixes. Dans ce chapitre, nous démontrons l'avantage d'un système radar avec dépointage du faisceau d'antenne par rapport à un système de détection fixe. Sur une route droite, le dépointage de faisceau permet de décrire le comportement des véhicules détectés et de les classer selon la nature du danger éventuel qu'ils représentent. Cette identification porte à la fois sur la reconnaissance et la discrimination des voies de circulation, les dépassements, les croisements sur une route à double sens. Sur une route courbe ces mêmes résultats sont obtenus en plus du gain considérable sur la distance de visibilité. La prise en compte de ces informations est importante pour élaborer une stratégie sûre de contrôle longitudinal. En effet, sur une route ouverte à la circulation, chaque véhicule influence plus ou moins fortement le comportement des autres. L'interaction qui en résulte peut être dangereuse ou pas selon les situations. L'objectif ici est d'identifier les comportements du véhicule détecté relativement au véhicule suiveur. Chaque situation possible résultant de ces comportements est alors désignée par le terme de scénario. Il s'agit donc de reconnaître différents scénarios du trafic routier afin de pouvoir les prendre en compte dans un pilotage automatique sûr. Ce chapitre s'intéresse également aux distributions de la Surface Equivalente Radar (SER) qui permettent l'observation des véhicules cibles, observation préalable à toute identification possible de scénario.

## 4.2 Hypothèses générales

Dans ce chapitre, nous considérons un véhicule équipé d'un système de perception avec dépointage de faisceau radar. Le faisceau de ce système sera considéré infiniment fin

au début de l'étude. On suppose que le dépointage du faisceau s'étend au plus sur une plage  $[-\beta, \beta]$  tel que :

$$0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \quad (4.1)$$

La configuration générale est la suivante : Le véhicule contrôlé roule au milieu de sa voie à la vitesse constante  $v_1$  sur une route à deux voies de circulation. La grandeur  $l$  désigne la largeur du véhicule contrôlé. Un second véhicule (ou véhicule cible) circule sur la même route (voie et sens quelconques) à la vitesse  $v_2$ . On ne s'intéresse qu'à la détection d'objets situés dans l'environnement routier délimité par les bordures de la route. La distance  $L$  (cf FIG.4.1) désigne la distance séparant les deux véhicules et  $\alpha$  désigne l'angle de dépointage du faisceau radar au moment de la détection du second véhicule par le système de perception du véhicule suiveur. Si  $L_{ant}$  désigne la distance maximale à laquelle le système de perception peut détecter un véhicule, on obtient alors  $L \leq L_{ant}$ . On définit également une inter-distance latérale de sécurité  $u_{safe}$  et la largeur de voie correspondante est alors notée  $w = l + 2u_{safe}$ . On désignera par distance de visibilité, la distance maximale à laquelle le véhicule contrôlé peut détecter sur sa voie un véhicule cible en supposant un niveau de puissance du signal retour toujours suffisant.

## 4.3 Scénarios de trafic sur route droite

### 4.3.1 Extraction de données pertinentes

L'objectif de cette section est de déterminer des facteurs discriminants permettant de caractériser les autres véhicules du trafic selon des critères de dangerosité afin de faciliter des prises de décision opportunes et efficaces pour éviter les accidents sur route droite. En d'autres termes, on souhaite ici identifier les différents scénarios pouvant survenir sur route droite. On considère que la route est à double sens. D'après la FIG.4.1, on a la relation :

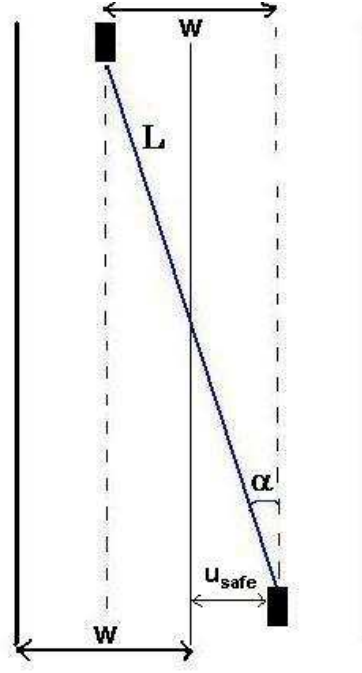


FIG. 4.1 – *configuration route droite*

$$\sin(\alpha) = \frac{w}{L} \quad (4.2)$$

La valeur minimale de  $\alpha$  à la distance de détection  $L$  est donnée par  $\alpha_0$  vérifiant :

$$\sin(\alpha_0) = \frac{l/2 + u_{safe}}{L} \quad (4.3)$$

Cela implique la relation suivante :

$$\alpha_0 = \sin^{-1}\left(\frac{l/2 + u_{safe}}{L}\right) \quad (4.4)$$

Il en vient que dans le cas où les deux véhicules roulent en sens inverse, la relation suivante doit être vérifiée :

$$\alpha \geq \alpha_0 = \sin^{-1}\left(\frac{l/2 + u_{safe}}{L}\right) \quad (4.5)$$

Ainsi, lorsqu'un véhicule en sens inverse est détecté à la distance  $L$  avec un angle de détection  $\alpha$ , la valeur de  $\alpha$  doit être supérieure à  $\alpha_0$  pour s'assurer que le véhicule détecté roule sur la bonne voie. Dans le cas contraire, le véhicule contrôlé devra ralentir pour prévenir une collision éventuelle.

Afin de poursuivre l'analyse, nous dérivons la relation (4.2), ce qui nous conduit à :

$$\cos(\alpha)\dot{\alpha} = -\frac{w}{L^2}\dot{L} \quad (4.6)$$

$u$  et  $L$  ont des valeurs positives ;  $\cos(\alpha) > 0$  puisque  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ . Aussi, si nous considérons que la distance  $L$  croît avec le temps, (c-à-d.  $\dot{L} > 0$ ), on obtient  $\dot{\alpha} < 0$ . Dans ce cas, les deux véhicules roulent dans la même direction, le véhicule suiveur roulant à une vitesse inférieure à celle du véhicule détecté ( $v_1 < v_2$ ). Au contraire, si  $L$  décroît avec le temps, (c-à-d.  $\dot{L} < 0$ ), on obtient  $\dot{\alpha} > 0$  et les deux véhicules roulent soit dans la même direction auquel cas le véhicule suiveur va plus vite ( $v_1 > v_2$ ), soit les deux véhicules se croisent.

Le sens de variation de  $\alpha$  permet ainsi de disposer de certaines informations sur le scénario en cours :

- Lorsque  $\dot{\alpha}$  est positif, les véhicules se rapprochent l'un de l'autre.
- Lorsque  $\dot{\alpha}$  est négatif, les véhicules s'éloignent l'un de l'autre.

On s'aperçoit tout de même que certaines indéterminations demeurent lorsque  $\dot{\alpha}$  seul est utilisé pour caractériser les scénarios. Dans le cas  $\dot{\alpha} > 0$  par exemple, on ne peut conclure si les véhicules se croisent ou au contraire vont dans la même direction.

Afin de résoudre ce problème, considérons un déplacement infinitésimal  $dx$  du véhicule détecté sur une durée infinitésimale  $dt$ .  $dx$  comprend de fait le déplacement infinitésimal opéré par le véhicule suiveur ainsi que celui opéré par le véhicule détecté durant l'intervalle de temps  $dt$ . La FIG.4.2 illustre  $dx$  et  $d\alpha$ .

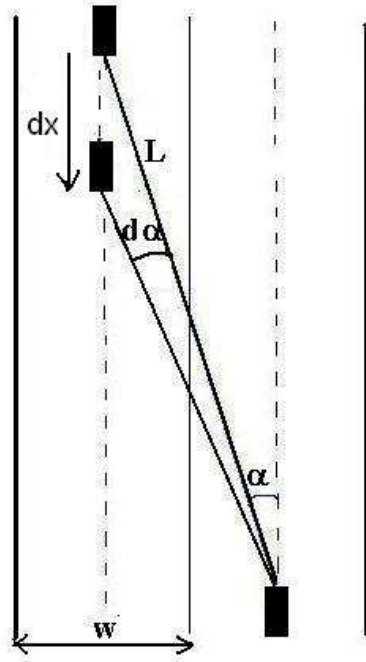


FIG. 4.2 – *Illustration de  $dx$  et  $d\alpha$*

On a :

$$dx = Ld\alpha \quad (4.7)$$



Cette relation permet d'exprimer la vitesse relative  $v$  :

$$v = \frac{dx}{dt} = L\dot{\alpha} \quad (4.8)$$

En pratique, on peut mesurer la vitesse  $v$  à partir des instants consécutifs de détection  $t$  et  $t + dt$  par :

$$v = \frac{L_t \cos(\alpha_t) - L_{t+1} \cos(\alpha_{t+1})}{dt} \quad (4.9)$$

### 4.3.2 Identification des scénarios

En définitive, on peut distinguer désormais cinq scénarios pouvant servir de base à une stratégie de régulation de vitesse :

1.  $|v| = v_1$  : Dans ce cas, le véhicule détecté est en réalité arrêté sur la route.
2.  $|v| > v_1$  et  $\dot{\alpha} > 0$  : le véhicule détecté croise le véhicule suiveur et roule à la vitesse  $v_2 = |v| - v_1$ .
3.  $|v| > v_1$  et  $\dot{\alpha} < 0$  : les deux véhicules roulent dans la même direction et  $v_2 > 2v_1$ .
4.  $|v| < v_1$  et  $\dot{\alpha} > 0$  : les deux véhicules roulent dans la même direction et le véhicule suiveur est le plus rapide  $v_1 > v_2$
5.  $|v| < v_1$  et  $\dot{\alpha} < 0$  : les deux véhicules roulent dans la même direction avec  $v_1 < v_2 < 2v_1$ .

La connaissance de  $\dot{\alpha}$  et  $v$  suffit à décrire tous les scénarios possibles dans la configuration ligne droite. Le véhicule suiveur ayant ainsi une certaine connaissance de son environnement peut réagir de manière appropriée et préventive.

La stratégie de détection par dépointage de faisceau permet dans la configuration "route droite" de caractériser les scénarios possibles de croisement ou de dépassement ainsi que leurs caractères (dangereux ou pas). La section suivante s'intéresse au cas d'une configuration de type route courbe. Là encore, nous allons mettre en évidence la manière dont le dépointage de faisceau améliore de façon importante la distance de détection réelle et permet ainsi une discrimination des situations.

## 4.4 Scénarios de trafic sur routes courbes

### 4.4.1 Bénéfice du dépointage du faisceau d'antenne sur la visibilité- Détection du véhicule cible sur la voie du véhicule contrôlé

Les développements suivants montrent que le dépointage du faisceau d'antenne augmente très sensiblement la distance de détection des obstacles sur routes courbes. La FIG.4.3 donne une illustration de la configuration route courbe dans laquelle nous nous plaçons.

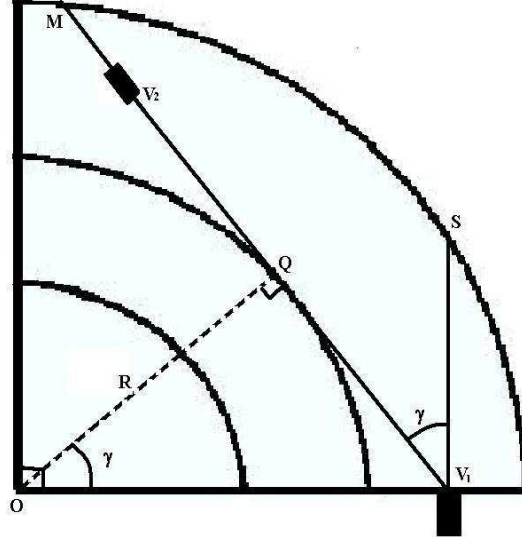


FIG. 4.3 – *Illustration d'une route courbe*

Sur cette figure,  $V_1$  indique la position du véhicule contrôlé. La distance  $V_1S$  correspond à la distance de visibilité du radar dans le cas d'un système sans dépointage. La distance  $V_1M$  quant à elle correspond à la nouvelle distance dans une stratégie avec dépointage du faisceau d'antenne.  $V_1V_2$  est alors la distance de visibilité pour un obstacle situé au centre de la voie. Nous désignons par  $R$  le rayon de courbure de la route et par  $w$  la largeur d'une voie.

On se place dans le repère orthogonal d'origine  $O$  dans lequel  $V_1$  a pour coordonnées  $(R + \frac{w}{2}, 0)$  et  $y_S > 0$ .  $\gamma$  (cf FIG.4.3) désigne l'angle de détection défini par :

$$\cos(\gamma) = \frac{R}{R + w/2} \quad (4.10)$$

Les coordonnées du point  $Q$  sont données par :

$$Q : \begin{cases} x_Q = R \cos(\gamma) \\ y_Q = R \sin(\gamma) \end{cases} \quad (4.11)$$

Dans ce repère, la droite  $(V_1Q)$  a pour équation :

$$(V_1Q) : x \cos(\gamma) + y \sin(\gamma) = R \quad (4.12)$$

On peut alors définir les points  $S$ ,  $M$  et  $V_2$  par :

$$S : \begin{cases} x_S = R + w/2 \\ x_S^2 + y_S^2 = (R + w)^2 \\ y_S > 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

$$M : \begin{cases} x_M \cos(\gamma) + y_M \sin(\gamma) = R \\ x_M^2 + y_M^2 = (R + w)^2 \\ y_M > 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

et

$$V_2 : \begin{cases} x_{V_2} \cos(\gamma) + y_{V_2} \sin(\gamma) = R \\ x_{V_2}^2 + y_{V_2}^2 = (R + w/2)^2 \\ y_{V_2} > 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

La résolution de ces systèmes d'équations conduit aux résultats suivants :

$$S : \begin{cases} x_S = R + w/2 \\ y_S = \sqrt{Rw + \frac{3}{4}w^2} \end{cases} \quad (4.16)$$

$$M : \begin{cases} x_M = R \cos(\gamma) - \sqrt{2Rw + w^2} \sin(\gamma) \\ y_M = \frac{1}{\sin(\gamma)} [R - R \cos^2(\gamma) + \sqrt{2Rw + w^2} \cos(\gamma) \sin(\gamma)] \end{cases} \quad (4.17)$$

$$V_2 : \begin{cases} x_{V_2} = R \cos(\gamma) - \sqrt{Rw + w^2/4} \sin(\gamma) \\ y_{V_2} = \frac{1}{\sin(\gamma)} [R - R \cos^2(\gamma) + \sqrt{Rw + w^2/4} \cos(\gamma) \sin(\gamma)] \end{cases} \quad (4.18)$$

La FIG.4.4 montre comment la distance de détection est améliorée dans la stratégie utilisant le dépointage de faisceau. Pour cette figure, on a pris une largeur de voie  $w = 3m$ .

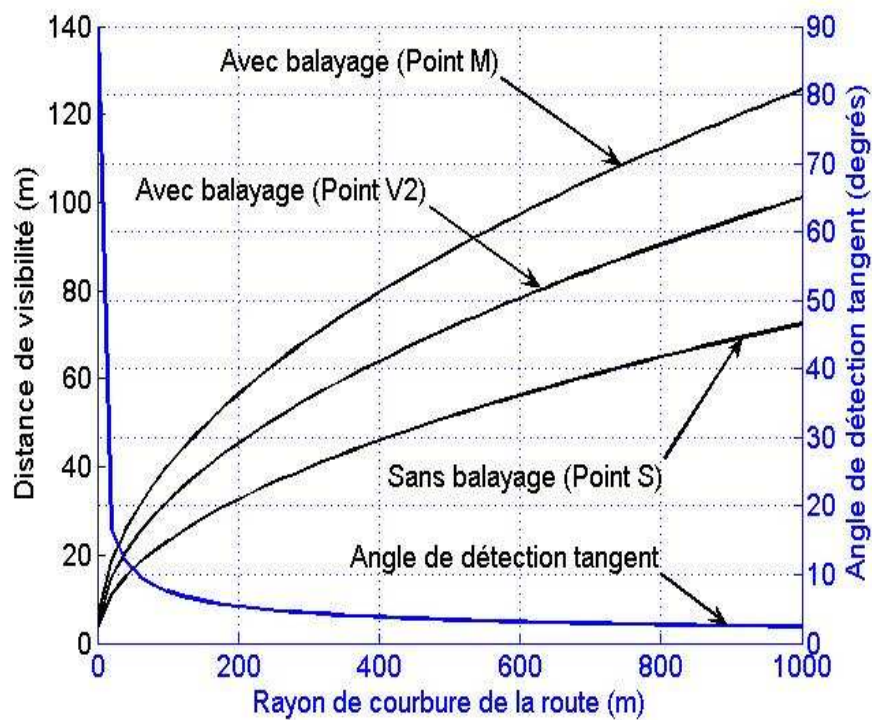


FIG. 4.4 – Influence du dépointage de faisceau sur la visibilité

On peut noter que la distance de visibilité a en effet sensiblement augmenté dans la stratégie de dépointage de faisceau d'antenne par rapport à la stratégie sans dépointage. Une telle amélioration permet une détection beaucoup plus rapide et donc un contrôle plus anticipé et plus sûr. Pour un angle de dépointage limité par  $\gamma$ , on est capable de détecter seulement les véhicules cibles roulant sur la voie du véhicule contrôlé.

#### 4.4.2 Détection du véhicule cible sur une voie quelconque

Afin de pouvoir détecter les véhicules circulant sur l'autre voie, il est nécessaire d'étendre le dépointage au delà de  $\gamma$ . Toutefois, une ambiguïté apparaît du fait que l'obstacle alors détecté peut être situé sur l'une ou l'autre voie. Cette indétermination existe pour des valeurs angulaires de détection  $\delta$  vérifiant  $\gamma < \delta \leq \beta$  (cf FIG.4.5). Aussi est-il important de pouvoir identifier les scénarios lorsque le véhicule obstacle roule sur la même voie que le véhicule contrôlé et les différencier des autres. Pour cela, supposons qu'un véhicule  $V_2$  est détecté. Soit  $P$  et  $T$  respectivement le point de la ligne médiane et le point du cercle extérieur tels que  $V_1$ ,  $N$ ,  $P$  et  $T$  soient alignés (cf. FIG.4.5). On a :

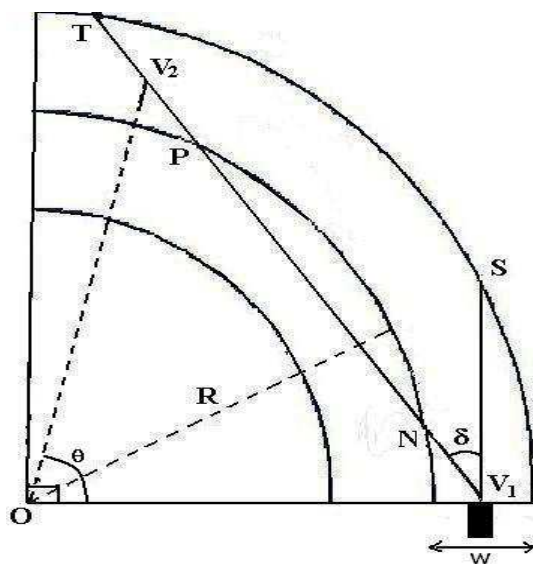


FIG. 4.5 – *Scénario avec  $\delta > \gamma$*

$$N : \begin{cases} x_N = (R + w/2) - y_P \tan(\delta) \\ y_N = \frac{1}{2(1 + \tan^2(\delta))} [2(R + w/2) \tan(\delta) - \\ (4(R + w/2)^2 \tan^2(\delta) - \\ 4(1 + \tan^2(\delta))(Rw + w^2/4))^{1/2}] \end{cases} \quad (4.19)$$

$$P : \begin{cases} x_P = (R + w/2) - y_P \tan(\delta) \\ y_P = \frac{1}{2(1 + \tan^2(\delta))} [2(R + w/2) \tan(\delta) + \\ (4(R + w/2)^2 \tan^2(\delta) - \\ 4(1 + \tan^2(\delta))(Rw + w^2/4))^{1/2}] \end{cases} \quad (4.20)$$

$$T : \begin{cases} x_T = (R + w/2) - y_T \tan(\delta) \\ y_T = \frac{1}{2(1+\tan^2(\delta))} [2(R + w/2)\tan(\delta) + \\ (4(R + w/2)^2 \tan^2(\delta) + \\ 4(1 + \tan^2(\delta))(Rw + 3w^2/4))^{1/2}] \end{cases} \quad (4.21)$$

$$V_2 : \begin{cases} x_{V_2} = (R + w/2) - y_{V_2} \tan(\delta) \\ y_{V_2} = \frac{(2R+w)\tan(\delta)}{1+\tan^2(\delta)} \end{cases} \quad (4.22)$$

où  $\gamma < \delta < \beta$ .

Le véhicule  $V_2$  détecté selon un angle  $\delta > \gamma$  roule sur la même voie que le véhicule contrôlé si et seulement si :

$$\begin{cases} \|V_1P\| < \|V_1V_2\| < \|V_1T\| \\ ou \\ \|V_1V_2\| < \|V_1N\| \end{cases} \quad (4.23)$$

En pratique, si la distance de détection est  $L$ , cette relation devient :

$$\begin{cases} \|V_1P\| < L < \|V_1T\| \\ ou \\ L < \|V_1N\| \end{cases} \quad (4.24)$$

Si par contre  $L < \|V_1P\|$  alors dans la configuration décrite FIG.4.3, le véhicule détecté roule sur une autre voie. Ainsi, est-on à même de discriminer un véhicule roulant sur la même voie que le véhicule contrôlé d'un véhicule circulant sur une autre voie. Toutefois, l'identification précise des scénarios nécessite une analyse plus poussée.

#### 4.4.3 Identification des scénarios

Comme dans le cas de la configuration "route droite", on peut identifier les scénarios dans la configuration route courbe. Cette identification repose sur la distance de détection directe  $L$  et la mesure de la vitesse angulaire relative  $\dot{\theta}$ . On suppose que le véhicule détecté circule sur la voie différente. L'application du théorème d'Al-Kashi au triangle  $OV_1V_2$  induit :

$$L^2 = (R - w/2)^2 + (R + w/2)^2 - 2(R - w/2)(R + w/2)\cos(\theta) \quad (4.25)$$

d'où :

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{2R^2 + w^2/2 - L^2}{2R^2 - w^2/2}\right) \quad (4.26)$$

En dérivant l'équation 4.25 on obtient la vitesse angulaire relative  $\dot{\theta}$  :

$$\dot{\theta} = \frac{L\dot{L}}{(R^2 - w^2/4)\sin(\theta)} \quad (4.27)$$

ce qui donne l'expression finale de  $\dot{\theta}$  :

$$\dot{\theta} = \frac{L\dot{L}}{(R^2 - w^2/4)\sin(\cos^{-1}(\frac{2R^2+w^2/2-L^2}{2R^2-w^2/2}))} \quad (4.28)$$

Les vitesses angulaires absolues du véhicule contrôlé et du véhicule détecté s'écrivent respectivement :

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_1 &= \frac{v_1}{R+w/2} \\ \dot{\theta}_2 &= \frac{v_2}{R-w/2} \end{aligned} \quad (4.29)$$

En définitive, on peut cette fois encore identifier 5 scénarios disjoints et complets :

1.  $|\dot{\theta}| > \dot{\theta}_1$  et  $\dot{L} < 0$  : les deux véhicules se croisent.
2.  $|\dot{\theta}| > \dot{\theta}_1$  et  $\dot{L} > 0$  : les deux véhicules roulent dans la même sens et on a  $\frac{v_2}{R+w/2} > 2\dot{\theta}_1$ .
3.  $|\dot{\theta}| = \dot{\theta}_1$  : le véhicule détecté est arrêté sur sa voie.
4.  $|\dot{\theta}| < \dot{\theta}_1$  et  $\dot{L} < 0$  : les deux véhicules roulent dans le même sens et on a  $\dot{\theta}_1 > \dot{\theta}_2$ .
5.  $|\dot{\theta}| < \dot{\theta}_1$  et  $\dot{L} > 0$  : les deux véhicules roulent dans le même sens et on a  $\dot{\theta}_1 < \dot{\theta}_2 < 2\dot{\theta}_1$ .

Dans une configuration route courbe, la distance euclidienne entre un véhicule obstacle et le véhicule contrôlé circulant sur la même voie (cette distance est égale à la distance de détection) est différente de la distance curviligne qui est la distance de parcours réel séparant les deux véhicules, la distance curviligne étant toujours plus grande que la distance de détection. En notant  $d$  la distance curviligne entre les deux véhicules dans une telle configuration,  $d$  s'évalue de la manière suivante :

$$d = (R + w/2)\theta, \quad (4.30)$$

soit :

$$d = (R + w/2)\cos^{-1}\left(1 - \frac{L^2}{2(R + w/2)^2}\right) \quad (4.31)$$

Les résultats présentés dans les sections précédentes sont fondés sur une analyse théorique supposant un radar de type laser (c'est-à-dire avec une ouverture du faisceau d'antenne infiniment petite) et sans tenir compte de la surface équivalente radar des cibles détectées. Il est évident qu'en situation réelle, la prise en compte de la SER des cibles ainsi que de la nature des diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception est indispensable puisque ces données agissent directement sur le seuil de détection. De ce point de vue, les résultats théoriques précédents peuvent être considérés comme des repères indiquant ce que l'on peut espérer atteindre dans le meilleur des cas.

## 4.5 Evaluation de la distribution de SER

La détection des véhicules s'effectue à travers le niveau de puissance du signal retour par rapport à un seuil prédéfini. Comme annoncé précédemment, le système de perception utilisé dans la plupart des applications à la conduite intelligente est le radar. Par conséquent, la connaissance de la réponse des véhicules aux signaux radar qu'ils reçoivent lors d'une opération de détection est indispensable et doit être prise en compte lors de la conception de tels systèmes [81,82]. Aussi est-il indispensable d'étudier la distribution de la SER sur certains véhicules.

La SER d'un véhicule mesure sa capacité à réfléchir les signaux radar en direction du récepteur radar. C'est le rapport entre la puissance du signal réfléchi par stéradian (unité d'angle solide) en direction du radar (dans les applications automobiles, les systèmes radar sont quasi monostatiques) sur la densité de puissance interceptée par ce véhicule. La SER d'une cible peut donc être évaluée en relevant les niveaux de puissance du signal d'émission vers la cible et de réception en provenance de celle-ci. Mais d'autres méthodes reposent sur une étude de l'image radar de la cible [83].

Ici, notre objectif consiste à évaluer la distribution de SER sur des véhicules automobiles. Cette évaluation peut se faire à travers une simulation ou une mesure directe.

Notre objectif initial était d'estimer la SER expérimentalement, ce qui sera présenté par la suite. Mais afin d'avoir une idée de cette SER à 77 GHz et sa dépendance angulaire, des simulations ont tout d'abord été menées.

### 4.5.1 Estimation de la distribution de SER par simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulations effectuées pour évaluer la distribution de SER. Bien évidemment, cette distribution est sujette à une certaine variation selon le véhicule utilisé. Dans cette thèse, nous avons utilisé FEKO comme logiciel de simulation et utilisé comme automobile un véhicule déjà maillé que FEKO met à la disposition des utilisateurs ( FIG.4.6). Ce véhicule étant initialement maillé par FEKO pour les applications à 900MHz, nous avons dû le remailler à 77GHz pour évaluer la SER à cette fréquence. Le procédé de simulation simule l'éclairement de l'arrière du véhicule par une onde plane à 77GHz sous la plage d'éclairement angulaire allant de  $-10^\circ$  à  $+10^\circ$ . La FIG.4.7 illustre les résultats obtenus. On y constate que la distribution de SER est irrégulière même si elle est parfaitement symétrique dans le cadre de la simulation. On observe pour ce véhicule des pics de SER d'environ 17dBsm autour des angles d'éclairement de  $\pm 3^\circ$  tandis qu'un creux est obtenu à angle nul. On s'attendait plutôt à un maximum de SER dans l'axe, ce qui n'est pas parfaitement le cas. Cependant, il faut rappeler que la SER est très sensible à la forme de la voiture mais que le résultat est aussi sensible au maillage peut-être imparfait. Toutefois, les valeurs de l'ordre de 15dBsm autour de l'axe ne semblent pas abhéroentes par rapport aux valeurs vues dans la littérature. Dans la présente simulation, le véhicule a été simulé seul en négligeant les effets dus au sol.

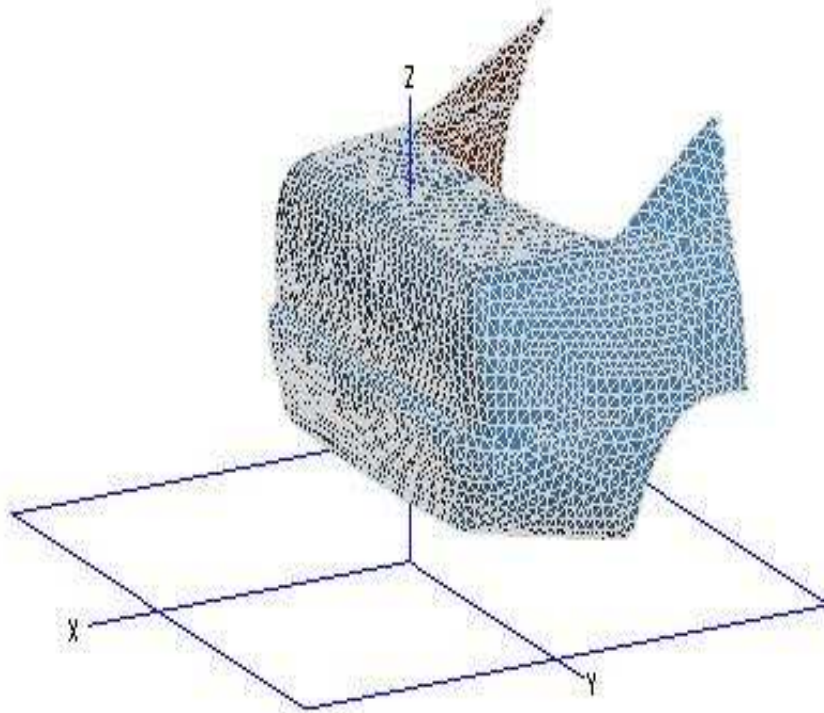


FIG. 4.6 – *Arrière de véhicule utilisé pour la simulation*

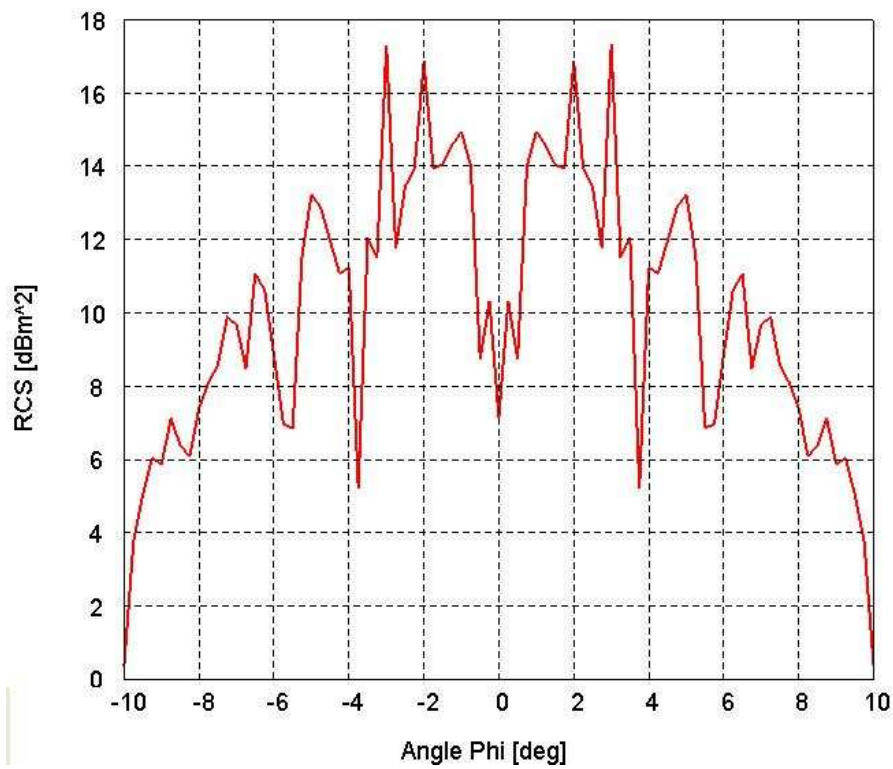


FIG. 4.7 – *Distribution de SER obtenue par simulation*



## 4.5.2 Procédure de mesure de la distribution de SER

Dans cette partie, nous présentons une procédure d'évaluation de la distribution de SER à 77 GHz. Les mesures sont effectuées sur une Ford Focus break et une Peugeot 206. Ces mesures n'ont pas pu être effectuées sur la voiture utilisée en simulation car celle-ci était un modèle prédéfini dans FEKO.

Le système de mesure de SER est basé sur un analyseur de réseau Rhode & Schwartz muni de têtes millimétriques en bande W, placées côte à côte pour avoir une configuration quasi-monostatique. L'analyseur de réseau est calibré pour mesurer les coefficients de transmission pour chaque valeur de l'angle  $\theta$ . La configuration du système de mesure est décrite sur la FIG.4.8 où Antenne TX désigne l'antenne d'émission et Antenne RX désigne l'antenne de réception. La valeur de SER correspondant au niveau du signal reçu est évaluée à partir de l'équation radar donnée ci-dessous :

$$P_r = P_e \frac{G_e G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (4.32)$$

où :

$P_r$  = Puissance reçue

$P_e$  = Puissance émise

$G_e$  = Gain de l'antenne d'émission

$G_r$  = Gain de l'antenne de réception

$\lambda$  = Longueur d'onde du signal radar à 77 GHz

$\sigma$  = SER du véhicule

$R$  = Distance radar-cible

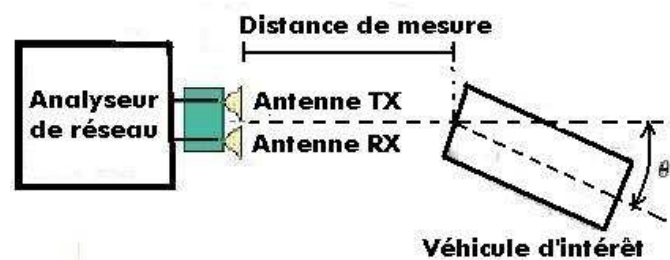


FIG. 4.8 – *Mesure de SER : configuration*

La TAB.4.1 indique les spécifications du système de mesure lors de l'évaluation de la distribution de SER. Deux configurations sont considérées : Dans la configuration désignée configuration1, l'onde radio est transmise par une antenne-lentille de 32 dB de gain. Dans la configuration dénommée configuration2, une antenne cornet est employée pour transmettre l'onde électromagnétique. Cette antenne a un gain de 22dB (voir TAB.4.1). Ces deux configurations ont été testées et comparées afin de s'assurer que l'on illuminait bien le véhicule et pour garantir un rapport signal à bruit suffisant.

TAB. 4.1 – Spécifications du système de mesure de SER

Fréquence d'intérêt	77 GHz
Bande de fréquence	75-100 GHz
Pas de fréquence	10 MHz
Puissance émise	+5dBm
Filtre IF	1KHz
Gain de l'antenne d'émission (TX) (Configuration1 ou configuration2)	32dB ou 22dB
Gain de l'antenne de réception RX (antenne-lentille)	32dB
Distance de mesure	10m
Filtrage en distance	20m

Le filtrage en distance permet d'annuler le fond de scène. A la distance de mesure de 10m il n'est pas évident que la cible soit éclairée avec une onde parfaitement plane (définition SER valide) mais il était difficile de se placer plus loin à cause de la planarité de la route et pour des problèmes de détection.

### 4.5.3 Résultats des mesures de la distribution de SER

Les FIG.4.9 et FIG.4.10 montrent la distribution de SER en fonction de la position angulaire  $\theta$  respectivement pour les cibles Ford Focus Break et Peugeot 206. On remarque que la distribution de SER varie de façon remarquable d'un véhicule à l'autre mais que le niveau de SER dans chaque cas semble conforter les résultats obtenus en simulation. Le niveau du signal retour, ainsi que les variations suivant l'angle de positionnement sont fortement différents. A  $\theta = 0$ , la SER atteint un niveau maximum de 13dBsm sur la Ford Focus Break. Pour des difficultés d'alignement, la valeur maximale de SER est observée autour de  $-1^\circ$  pour la Peugeot 206 et vaut environ 6 dBsm. Un autre pic de valeur comparable est observé autour de  $\theta = -5^\circ$ .

Les différences observées dans le niveau et la forme de SER entre la Ford Focus Break et la Peugeot 206 peuvent s'expliquer par le fait que les deux véhicules sont de formes différentes, mais aussi probablement du fait de la différence des matériaux entrant dans leur construction, de leur angle d'inclinaison et des éléments arrière illuminés par le radar. En effet, la distribution de SER est non seulement très sensible à la forme mais également aux matériaux qui entrent dans la composition de la cible.

Afin de maximiser le nombre de points brillants contribuant à la distribution de SER ainsi que le rapport signal à bruit, deux configurations ont été considérées : dans la configuration1, une antenne de 29.5 dBi de gain est utilisée sur le port d'émission tandis que dans la configuration2 une antenne de 22 dBi de gain est utilisée sur le port d'émission. Chacune des deux configurations a été testée sur chaque véhicule. Si dans le cas de la Peugeot 206 on n'observe pas de différences significatives sur les distributions de SER obtenues, on remarque en revanche, que la configuration2 donne un niveau de SER plus élevé que la configuration1 dans le cas de la Ford Focus Break. Cela peut s'expliquer par le

fait que dans la configuration2 l'antenne d'émission ayant une plus grande ouverture, elle parvient à éclairer une plus grande surface du véhicule que l'antenne d'émission dans la configuration1. De ce fait, la distribution de SER issue de la configuration2 a été retenue pour la Ford Focus Break.

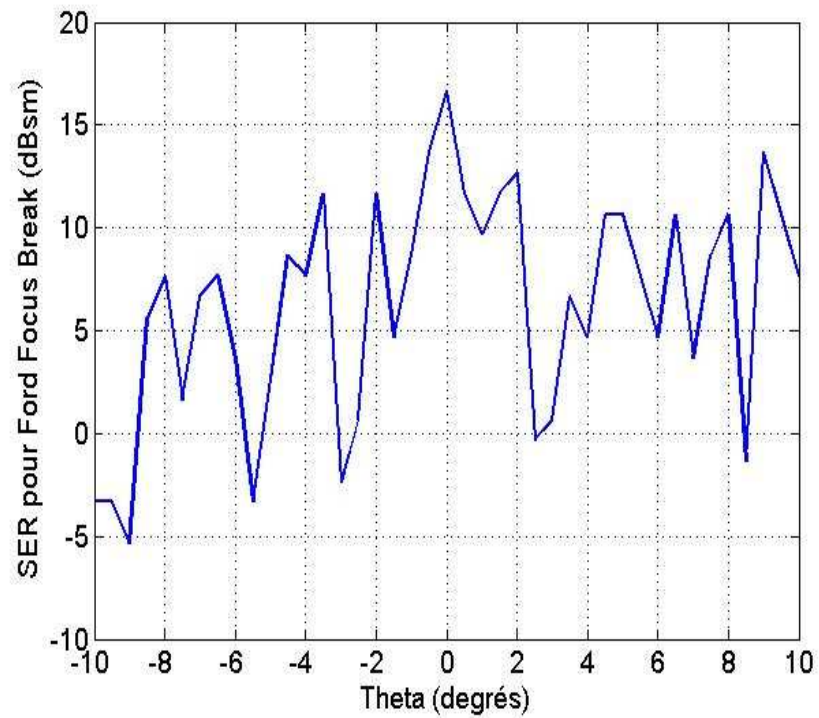


FIG. 4.9 – *Distribution de SER pour une Ford Focus Break*

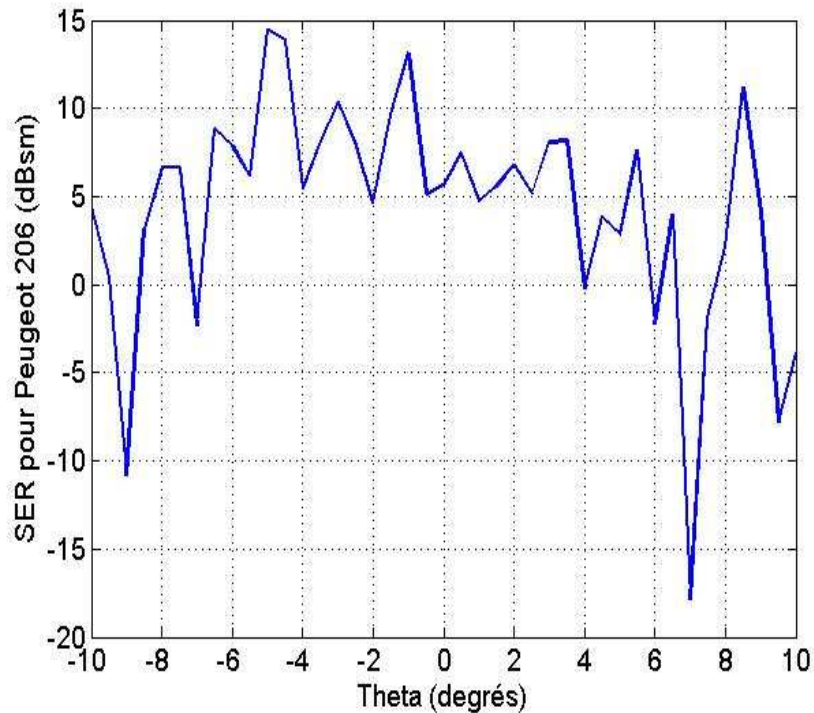


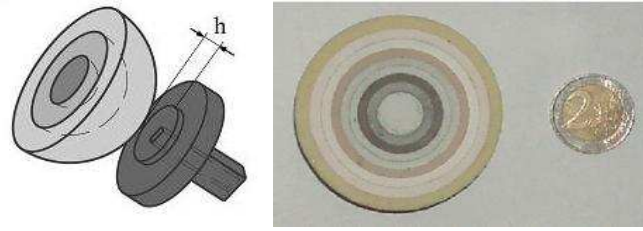
FIG. 4.10 – *Distribution de SER pour une Peugeot 206*

D'après les résultats précédents, il vient que la connaissance des distributions de SER est importante pour le choix de cette valeur seuil. En effet, le niveau de SER influence directement le niveau du signal retour récupéré par l'antenne de réception.

Dans cette partie, nous avons établi que la SER est une variable sujette à de grandes variations d'un véhicule-cible à un autre et pour une même cible, d'une position angulaire à une autre. La connaissance de la distribution de SER est indispensable pour se faire une idée de la variation du niveau des signaux retour en fonction de l'angle d'éclairage. Cependant, l'évaluation d'une distribution de SER ne suffit pas, seule, à juger de la variation de ces niveaux étant donné que les antennes d'émission et de réception interviennent également dans l'équation radar avec des niveaux de gain mis en jeu variables suivant la forme de leur diagramme de rayonnement. Aussi nous intéressons-nous dans la section suivante au diagramme de rayonnement d'une antenne. L'objectif principal de cette section est de démontrer le bénéfice d'une stratégie de détection par dépointage de faisceau d'antenne par rapport aux usages classiques d'un diagramme non dépointé.

#### 4.5.4 Apports du dépointage dans la détection radar

Un véhicule en mouvement peut être détecté sous différentes positions angulaires. Si le système radar employé pour la détection intègre une antenne à diagramme de rayonnement fixe, la puissance du signal retour peut chuter fortement notamment lorsque l'antenne est très directive (par définition). Au contraire, la contribution de l'antenne d'émission au niveau du signal réfléchi demeure pratiquement constante si une stratégie de détection par dépointage est adoptée, pourvu que l'angle de dépointage respecte une



(a) Le principe de la construction de l'antenne  
 (b) La lentille à 9 coquilles

FIG. 4.11 – L'antenne-lentille [85]

certaine plage. Dans une telle configuration, une éventuelle chute, selon la position angulaire, du niveau du signal retour, est la cause d'une chute du niveau de SER correspondant à cet angle et par rapport à la position angulaire pour laquelle la SER est maximale.

Dans cette partie, nous considérons une antenne reconfigurable réalisée au sein de l'Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes (I.E.T.R) [84]. Cette antenne fonctionne dans la bande de 77GHz [85]. Sa construction est basée sur une lentille HMFE (Half Maxwell Fish Eye) formée de 9 coquilles diélectriques homogènes et concentriques. Cette lentille est dite inhomogène c'est-à-dire que son indice de réfraction varie radialement. Cette loi d'indice lui confère des propriétés de focalisation et de dépointage quand elle est correctement illuminée par une source. Dans notre cas, la lentille est alimentée par un guide d'onde ( FIG.4.11). Son gain à 77 GHz est de 28.5 dB environ.

L'intérêt du choix de cette antenne réside dans le fait que le dépointage de son faisceau est possible en déplaçant latéralement la source d'éclairement sous la lentille. Cette antenne lentille est donc bien adaptée à une stratégie de détection par dépointage de faisceau d'antenne.

Cette antenne présente un diagramme de rayonnement très directif et l'on s'aperçoit que son niveau de gain décroît très rapidement lorsque l'on s'éloigne du centre. La FIG.4.12 montre que le niveau de gain maximal est obtenu à 0° et vaut 28.2 dB. Cette valeur chute à 13.0 dB à seulement 8° du centre, ce qui correspond à une perte de plus de 15 dB. Avec une stratégie de détection par dépointage, le gain est de 27.2 dB à 8°.

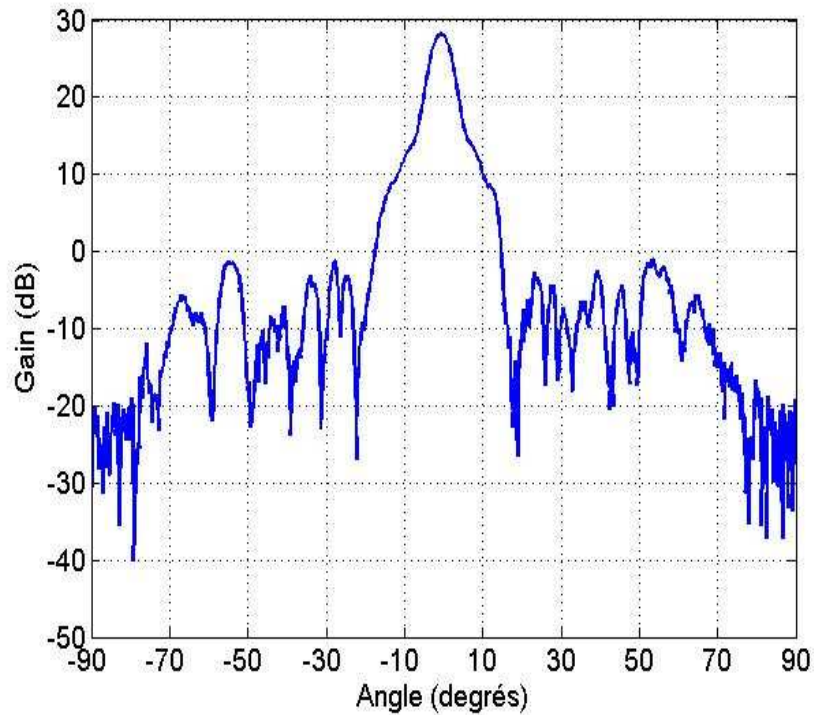
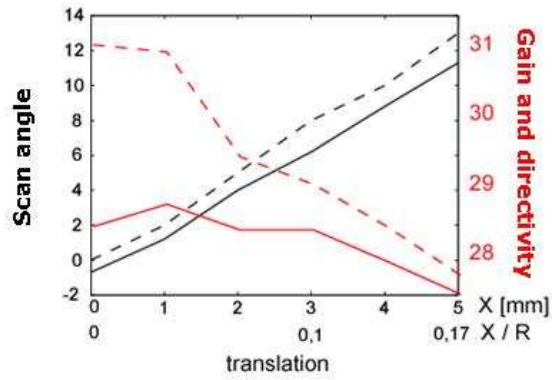


FIG. 4.12 – *Diagramme de rayonnement de l'antenne-lentille*

Le gain de l'antenne reste stable lorsque l'on autorise une stratégie de détection par dépointage. Pour faire dépointer le diagramme de rayonnement de cette antenne, il suffit de déplacer la source d'éclairage dessous la lentille (FIG.4.13(a)). La distance de déplacement de la source depuis sa position de référence équivaut à un diagramme dépointé d'un angle déterminé. Pour cette antenne, le niveau de gain reste pratiquement stable sur une plage angulaire  $< 12^\circ$  comme l'indique la FIG.4.13(b). La FIG.4.14 montre les diagrammes de rayonnement mesurés pour cette antenne pour des angles de dépointage allant de  $0^\circ$  à  $+12^\circ$ .



(a) Le système de dé- (b) Variation du gain en fonction du dépointage  
pointage

FIG. 4.13 – Le pouvoir de dépointage de l’antenne

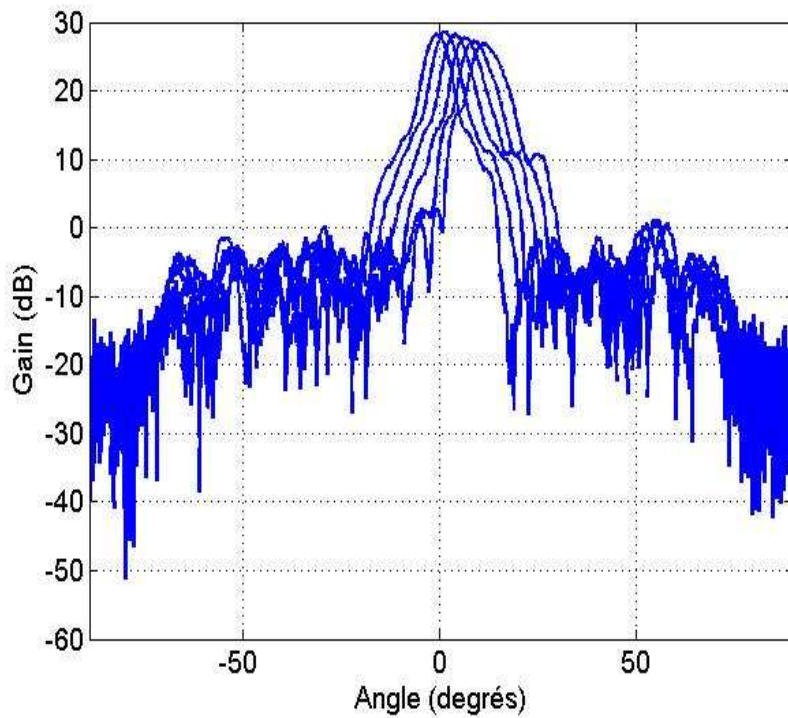


FIG. 4.14 – *Diagrammes de rayonnement dépointés de l’antenne-lentille pour une translation de 5 mm de la source dans un sens*

Afin d’évaluer l’intérêt du processus de dépointage sur la détection de véhicules, considérons une situation dans laquelle un véhicule équipé d’un système radar suit un véhicule cible. L’objectif dans cette partie est de comparer les résultats relatifs à la détection dans le cas où un dépointage du faisceau d’antenne est effectué et dans celui où le balayage n’est pas permis. Les diagrammes de rayonnement de la FIG.4.14 sont considérés dans le cas du dépointage de faisceau d’antenne tandis que le diagramme utilisé en l’absence de dépointage est celui donné dans la FIG.4.12. On considère qu’un dépointage de faisceau de  $8^\circ$  est suffisant pour détecter le véhicule-cible dans la plupart des cas. On fait également

TAB. 4.2 – L'opération de dépointage augmente le gain

Angle de détection en degrés ( $\theta$ )	0.0	1.3	4.0	6.2	8.0
Gain pour une stratégie à diagramme fixe (dB)	28.2	26.7	19.5	14.3	13.0
Gain pour une stratégie à diagramme dépointable (dB)	28.2	28.5	28.2	27.7	27.2
SER (dBsm)	16.7	10.7	4.7	4.7	10.7
Augmentation du gain dû au dépointage (dB)	0	1.8	8.7	13.4	14.2

les hypothèses suivantes, typiques des radars ACC actuels :

- Puissance du signal émis = 13 dBm
- La cible est une Ford Focus Break
- Le seuil de détection est de -90 dBm

La distance maximale à laquelle le véhicule cible peut être détecté est calculée selon l'équation radar sur la base des données figurant dans la TAB.4.2.

La FIG.4.15 affiche en fonction de la position angulaire de la cible, la distance maximale à laquelle la cible peut être détectée. La stratégie avec dépointage a une influence triviale sur l'amélioration de cette distance notamment pour des angles de détection relativement grands. Sur cette figure, on s'est limité à une plage angulaire allant de 0 à 8° ( $0^\circ \leq \theta \leq 8^\circ$ ), la symétrie complétant ce résultat sur la plage  $-8^\circ \leq \theta \leq 8^\circ$ .

On remarque également sur la figure que la distance de détection recommence à croître à partir de la position angulaire de 6°. Ce phénomène étonnant a priori peut néanmoins s'expliquer par les valeurs de la SER qui remontent globalement à nouveau pour la Ford Focus Break entre 6 et 8°. Dans ce cas-ci, cette augmentation est suffisante pour compenser les pertes correspondantes sur le niveau de gain de l'antenne et les pertes espace-libre supplémentaires.



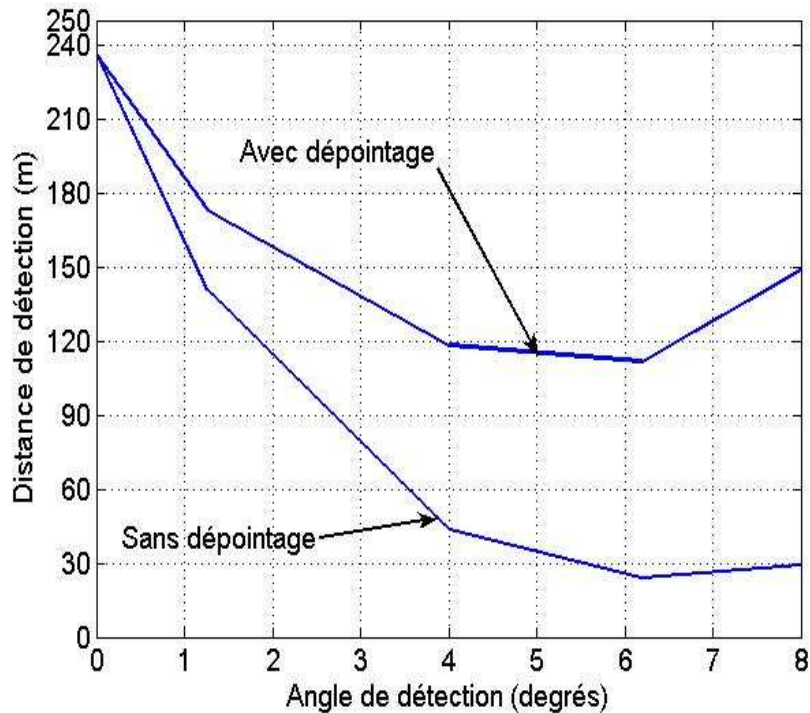


FIG. 4.15 – *Le dépointage accroît la distance de détection*

D'après la FIG.4.4, sur une route de rayon de courbure de 360 m, la distance de visibilité théorique pour un système radar avec dépointage est d'environ 75.5 m à l'angle de détection tangent de 4° tandis qu'elle n'est que de 43.5 m pour un radar à diagramme fixe. La FIG.4.15 montre que sur une telle route, si un véhicule Ford Focus Break se situe par rapport à un véhicule suiveur à une position angulaire d'environ 4°, la puissance du signal réfléchi par la Ford Focus Break sera suffisante pour que celle-ci soit détectable tant que la distance relative ne dépasse pas 75.5 m avec un système avec dépointage. Cette distance chute à seulement 43.5 m lorsqu'un radar à diagramme fixe est employé. On voit donc à quel point la distance de détection s'améliore avec le dépointage. En clair, si une telle situation se présentait dans un trafic réel, une stratégie de détection avec dépointage permettrait une détection de la Ford Focus bien plus tôt qu'une stratégie sans dépointage. Une telle rapidité de détection permet d'envisager des actions anticipatives pour la sécurité et le confort des passagers du véhicule contrôlé.

La stratégie de détection par dépointage présente au moins deux intérêts significatifs : d'après l'étude théorique, la distance de visibilité en est fortement accrue sur les routes courbes et le niveau de gain des antennes reste pratiquement constant et proche du niveau de gain maximum de l'antenne non dépointé. Les résultats théoriques ont également démontré que les informations temporelles permettent une identification des scénarios de croisement et de dépassement sur routes courbes comme sur routes droites. Même si les résultats théoriques ont été établis dans le cas d'un radar de type laser, par souci de simplicité, ils donnent une idée de ce que l'on peut espérer atteindre avec des systèmes radar améliorés.

## 4.6 Apports potentiels du dépointage de faisceau d'antenne dans les stratégies proposées

Quelle que soit la stratégie d'inter-distance adoptée, une détection précoce d'un éventuel obstacle est toujours souhaitable et assure que les états initiaux qui garantissent la sûreté de la stratégie seront respectés avec une probabilité plus importante. En cela, la détection de cibles par dépointage est avantageuse pour n'importe quelle politique de régulation d'inter-distance. Dans le chapitre 2 de cette thèse, nous avons proposé un nouveau modèle de référence comme consigne pour asservir l'accélération du véhicule en vue de mettre en œuvre les stratégies proposées. Ces deux stratégies ne diffèrent que par l'hypothèse sur la capacité de freinage du véhicule leader. Nous avons toutefois vu, que la seconde stratégie, sans réduire la sécurité permet de diminuer la distance de sécurité nécessaire. Dans cette partie, nous allons étudier en nous plaçant sur une route courbe, les apports potentiels d'une stratégie de détection par dépointage par rapport à une stratégie fixe sur la localisation effective d'obstacles en considérant des systèmes de régulation d'inter-distance basés sur les stratégies proposées. Le principe de l'étude est comme suit : connaissant en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur et de la vitesse du leader, les inter-distances de sécurité nécessaires pour garantir l'impossibilité d'une collision pour chacune des deux stratégies, nous comparons ces inter-distances aux distances de détection atteignables par une stratégie de perception par dépointage et une stratégie de perception à diagramme de rayonnement fixe. Cette comparaison permet de déterminer des situations dans lesquelles, les états initiaux qui garantissent le fonctionnement attendu des stratégies de contrôle d'inter-distance ne sont pas atteints par une stratégie de perception fixe tout en l'étant par une stratégie de détection par dépointage de faisceau d'antenne.

### 4.6.1 Apports sur la stratégie à taux de freinage infini

Nous nous intéressons ici aux apports potentiels d'une stratégie de détection par dépointage dans le cadre d'un contrôle longitudinal selon la politique à taux de freinage infini. Il s'agit d'évaluer pour les deux stratégies de détection, les conditions pour lesquelles la distance de détection est suffisante pour couvrir l'inter-distance de sécurité induite par la stratégie de commande.

Nous allons, pour ce faire, représenter sur une même figure, la distance de sécurité induite par la stratégie de contrôle à taux de freinage infini en fonction de la vitesse initiale du véhicule suiveur et la distance de détection maximale en fonction de l'angle de détection tangent pour chacune des deux stratégies de détection.

La FIG.4.16 montre les distances de sécurité et de détection dans le cas de la stratégie de détection sans dépointage. On note sur cette figure que lorsque le véhicule suiveur circule à la vitesse de 30m/s par exemple, la distance de sécurité alors nécessaire pour la stratégie de commande longitudinale est de 60 m environ. Or pour une cible Ford Focus Break, la distance de détection de 60 m est assurée seulement pour des angles de détection inférieurs à  $3.5^\circ$ . En d'autres termes, la Ford Focus, dans ces conditions n'est détectable sans dépointage que pour des positions angulaires relatives de moins de  $3.5^\circ$ .

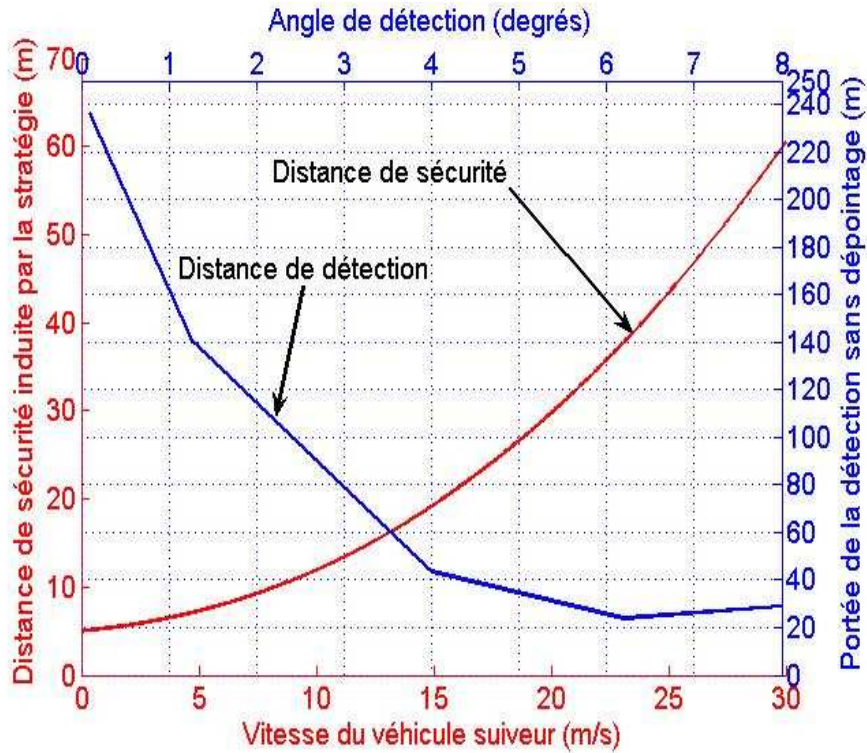


FIG. 4.16 – *Insuffisance de la stratégie de détection sans dépointage*

La FIG.4.17 montre les mêmes courbes pour une stratégie de détection par dépointage. On remarque que la distance de sécurité est couverte sur l'ensemble de la plage angulaire de détection, ce qui garantit qu'à tout moment la stratégie de commande longitudinale s'applique en partant de contraintes initiales satisfaites. Ces contraintes se résument essentiellement en ce qu'à l'instant  $t = 0$  où la régulation commence à agir sur l'inter-distance la relation suivante est vérifiée :

$$d_{detect} \geq d_0 \quad (4.33)$$

où  $d_{detect}$  désigne la distance de détection et  $d_0$  est l'inter-distance de sécurité définie au chapitre 2.

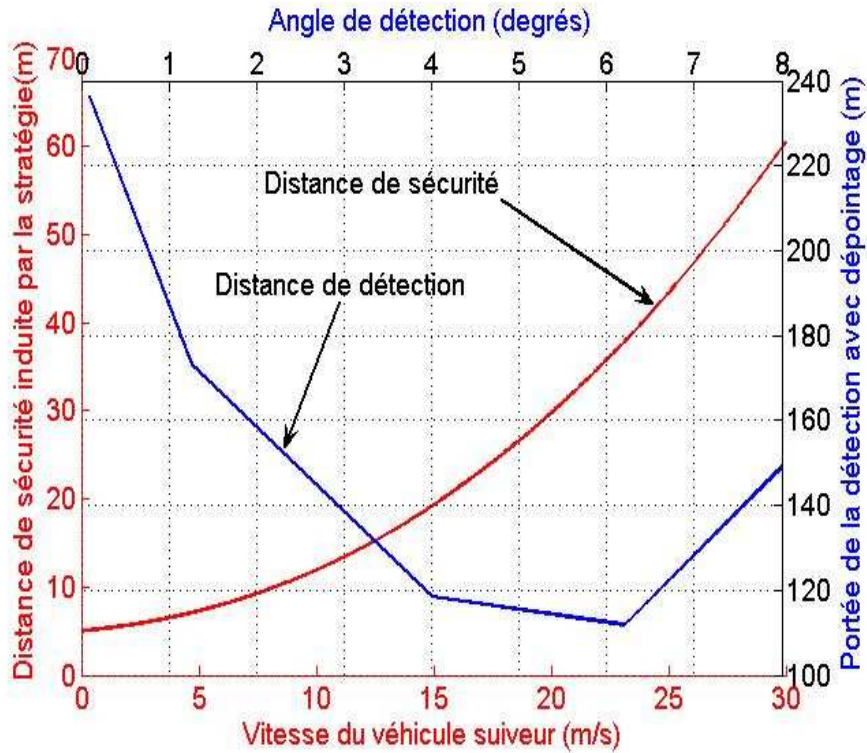


FIG. 4.17 – *Le dépointage garantit une détection sur l'ensemble de la plage angulaire de détection*

#### 4.6.2 Apports sur la stratégie à taux de freinage fini

Le chapitre 2 a démontré que l'inter-distance de sécurité nécessaire pour cette stratégie était plus faible que celle de la stratégie de commande longitudinale précédente. la FIG.2.22 montre que si le leader roule également à la vitesse de 30m/s la distance de sécurité nécessaire n'est plus que de 56 m soit une réduction de 4 m par rapport à la stratégie précédente. Quoique cette valeur ne puisse être négligée si l'on tient compte des phénomènes de congestion, la variation angulaire qu'elle induit sur une route courbe est très faible. Cela fait que les résultats obtenus sont pratiquement les mêmes que ceux montrés dans les FIG.4.16 et FIG.4.17. La plage de détection pour une stratégie de détection sans dépointage varie de 0 à moins de 3.5° tandis que l'ensemble de la plage de détection (0 à 8°) est couverte par la stratégie de détection par dépointage de faisceau d'antenne.

### 4.7 Conclusion

Le choix d'une stratégie de détection ne peut être considéré comme anodin, loin s'en faut. Nous avons démontré dans ce chapitre, de manière théorique d'abord les apports d'une stratégie de détection par dépointage par rapport à une stratégie de détection par diagramme fixe. En plus de permettre une classification élaborée de l'ensemble des scénarios possibles dans le trafic, le dépointage accroît sensiblement la distance de détection de cibles éventuelles. Cette propriété, en autorisant, une détection de plus longue distance permet d'obtenir dans plus de configurations que la distance de détection est plus grande

que l'inter-distance de sécurité définie par stratégie de commande d'inter-distance. En d'autres termes, avec une stratégie de détection par dépointage du faisceau d'antenne, on élargit la plage des scénarios pour lesquels la détection du véhicule leader intervient dans l'état libre défini par la stratégie de commande longitudinale.

Ce chapitre a également proposé une procédure simple d'évaluation de la Surface Equivalente Radar des véhicules afin de mieux connaître la nature de leurs réponses aux signaux radar utilisés pour leur détection. Il ressort que la distribution de SER varie fortement selon l'angle d'incidence du signal pour une même cible et à angles de détection identiques pour des véhicules cibles différents. Cette variation en fonction de la cible s'explique par la différence de forme entre les véhicules ainsi que la différence dans la composition de leurs structures physiques (matériaux).

En usant des données récoltées lors des opérations de mesure de SER, nous avons démontré, en utilisant les données d'une antenne réelle à 77 GHz, la supériorité de la stratégie de détection par dépointage sur la stratégie de détection par diagramme fixe, en terme de distance de détection. Nous avons montré pour cela, que le dépointage permettait de limiter considérablement la chute de gain liée à la grande directivité de l'antenne.

Enfin, nous avons montré sur un exemple précis, que la stratégie de détection par dépointage permettait de couvrir en situation réelle, une bande de détection angulaire bien plus large qu'une détection à diagramme fixe, dans le cas des stratégies proposées dans le chapitre 2 de cette thèse.

# Conclusions et perspectives

## 4.8 Résultats

L'objectif de cette thèse a été centré sur l'automatisation de la conduite, afin de permettre une amélioration des conditions de circulation en garantissant la sécurité et le confort des passagers. Il s'agit d'alléger la difficulté de la tâche de conduite et de réduire le stress affectant les conducteurs. Il s'avère alors indispensable de disposer de méthodes fiables, robustes et performantes.

Les travaux présentés ont été organisés en quatre principaux volets. Le premier d'entre eux a porté sur l'état de l'art des différentes technologies de perception, des stratégies de régulation de l'inter-distance véhiculaire et des études sur la stabilité des chaînes de véhicules automobiles.

Le deuxième volet a consisté à réaliser un suivi de véhicule en gérant l'inter-distance véhiculaire avec le véhicule qui précède le véhicule suiveur, et de l'adapter en fonction des conditions sur la dynamique des véhicules. Dans ce volet, un modèle de référence servant de consigne pour l'asservissement de l'accélération ainsi que deux stratégies de commande pour le suivi ont été proposés et développés. L'objectif est que le couplage de ces stratégies avec le modèle de référence puisse aboutir à des systèmes robustes qui garantissent dans des conditions extrêmes la sécurité des passagers, tout en réduisant l'inter-distance de sécurité nécessaire par rapport à une conduite humaine réglementaire. Les stratégies de contrôle font intervenir les données du véhicule précédent notamment sa position et sa vitesse relative à travers le modèle de référence. Des tests en simulation ont été effectués sur plusieurs scénarios de suivi de véhicule (conduite en mode libre, situations Stop&Go, instabilité de la vitesse du leader etc.) pour évaluer le comportement des stratégies de commande proposées en termes de performance et de robustesse. Les fondements théoriques ainsi que des résultats de simulation sur différents scénarios ont été présentés pour justifier de la fiabilité de ces stratégies.

Les résultats sur ces travaux ont fait l'objet de publications dans la conférence Intelligent Transportation Systems and Services Europe (ITS Europe 2008) et dans le journal Intelligent Transport System de la revue Institution of Engineering Technology (IET).

Même si le modèle proposé justifie de conditions de sécurité convenables, l'analyse de sa stabilité en chaîne pour au moins un scénario a paru nécessaire et motivé le troisième volet portant sur l'étude de la stabilité des chaînes de véhicules automobiles en général

et de celle de la stratégie en particulier. Le modèle étant fortement non linéaire, une fonction de transfert n'a pu être évaluée, et des résultats généraux sur la stratégie n'ont pu être établis. Toutefois, la stabilité de l'approche a été démontrée dans des scénarios pour lesquels une conduite manuelle échoue à être stable en chaîne. Au contraire, pour ces scénarios, il a été prouvé que la présence de quelques véhicules contrôlés suivant notre approche dans une chaîne mixte avec des véhicules manuels permettait de rétablir la stabilité de l'ensemble.

Ces résultats ont fait l'objet d'une publication dans la conférence Intelligent Transportation Systems and Services (ITS World Congress 2009).

La localisation d'un véhicule revient à le situer par rapport aux éléments structurants de son environnement. Cette tâche nécessite l'utilisation de capteurs permettant aux véhicules équipés d'appréhender l'environnement dans lequel ils évoluent. Ces capteurs se décomposent en deux catégories dont les capteurs extéroceptifs (Caméra, Radar...) qui permettent de détecter l'environnement dont la route et les obstacles.

Le quatrième volet de ce travail de recherche a été consacré à cette tâche. Pour assurer une régulation intelligente, le véhicule doit être à même d'accomplir un ensemble de fonctions autonomes. Parmi ces fonctions, la détection et l'extraction des caractéristiques dynamiques des autres usagers.

Dans ce volet, nous avons démontré l'importance du choix de la stratégie de détection. Nous avons prouvé notamment qu'une stratégie de détection par dépointage du faisceau d'antenne radar est meilleure qu'une stratégie de détection par diagramme fixe à bien des égards. Le dépointage permet une identification précise des scénarios du trafic routier, une détection longue portée dans les virages et offre l'avantage de maintenir quasiment constant le gain de l'antenne d'émission dans la phase de détection indépendamment de la position angulaire de la cible. Pour aboutir à ces résultats, il a été mis en œuvre une méthode expérimentale pour connaître la SER des véhicules, paramètre fondamental intervenant dans la détection.

Les résultats de ce volet ont été acceptés dans les congrès internationaux ITS France 2009, ITS World Congress 2009 et ITST 2009.

## 4.9 Perspectives

Le travail réalisé dans cette thèse a concerné à la fois la phase de commande de véhicule par le biais de l'automatique et la perception de l'environnement par le véhicule. De nombreux sujets restent à étudier dans chacun de ces apports.

Du point de vue de la commande, ce travail a présenté un système de contrôle longitudinal en boucle ouverte. Pour une implémentation réelle, la construction d'une boucle de commande fermée est indispensable et constitue un champ d'investigation intéressant pour cette stratégie. D'autre part, la commande a lieu ici dans une configuration telle qu'un seul véhicule leader est considéré. Une extension aux scénarios multicibles constitue également un sujet important de réflexion autant que les scénarios avec changement de file et insertion dans une file de véhicules. De même, une étude plus approfondie sur l'impact de la politique d'inter-distance sur un trafic prenant en compte, non seulement

la stabilité en chaîne mais en plus la “flow stability” est souhaitable. La flow stability [86] désigne l'évolution de la densité du trafic et de sa vitesse moyenne en réponse à une légère variation de la densité du trafic. Cette caractéristique est importante pour les zones de trafic situées à l'aval du point où la perturbation est introduite, par exemple, l'entrée de véhicules sur la voie d'accélération décrite sur la FIG.4.18, ou leur sortie sur une bretelle autoroutière. En dehors même de l'influence sur la stabilité du trafic, l'insertion ou la sortie d'un véhicule d'une chaîne est susceptible d'avoir des conséquences importantes sur la stratégie de commande. En effet, de telles manoeuvres font changer au véhicule suiveur son véhicule leader avec une modification généralement importante de la nouvelle inter-distance et donc des conditions initiales. Une étude de ce phénomène devrait a priori exiger de définir un algorithme de contrôle plus évolué afin de permettre le bon fonctionnement de la stratégie de commande.

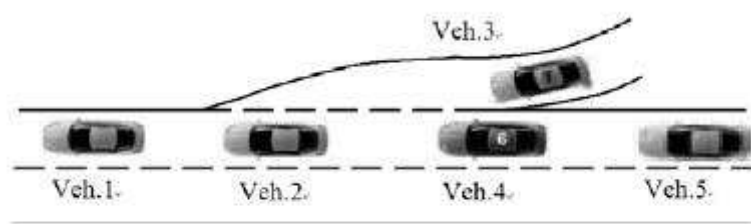


FIG. 4.18 – *Scénario d'insertion d'un véhicule dans une file [70]*

Du point de vue de la perception, l'influence de la stratégie de détection par dépointage dans les scénarios multicibles ainsi que les algorithmes de différentiation de cibles nécessaires pourraient être étudiés. En outre, une connaissance fine de la distribution de SER des véhicules serait alors nécessaire en estimant non plus uniquement la distribution de SER à l'arrière du véhicule mais également ses faces latérales. Enfin, la SER variant fortement avec le type de véhicule, il serait intéressant de pouvoir classifier les véhicules en fonction de la réponse angulaire typique de leur SER (voiture, camion, etc.). Des systèmes d'imagerie millimétrique pourraient d'ailleurs être utiles pour obtenir une telle classification.





# Annexe A

## Estimation de la distance de sécurité dans la stratégie à taux de freinage fini

Dans le cas de la stratégie de contrôle de l'inter-distance à taux de freinage fini, l'expression analytique de la distance de sécurité fait apparaître une intégrale que l'on ne peut encore évaluer manuellement. Pour cela, l'expression intégrale est approchée avec une méthode numérique de sommation-incrémentation.

Estimation numérique de  $\int_0^{t_0} (-\alpha e^{cd(t)}) dt$  et de  $x_1(t_0)$  :

Initialisation :

$$\begin{cases} d(0) = 0 \\ \dot{d}(0) = x_1(0) - x_2(0) \\ \ddot{d}(0) = -\alpha c \dot{d}(0) - \ddot{x}_2(0) \\ \dot{x}_1(0) = \dot{x}_1(0) \\ \ddot{x}_1(0) = -\alpha c \dot{d}(0) \end{cases} \quad (34)$$

Incrémentation :

$$\begin{cases} d(t + \Delta T) = d(t) + \Delta T \dot{d}(t) \\ \dot{d}(t + \Delta T) = \dot{d}(t) - \Delta T \ddot{d}(t) \\ \ddot{d}(t + \Delta T) = -\alpha c e^{cd(t+\Delta T)} \dot{d}(t + \Delta T) - \ddot{x}_2(t) \\ \dot{x}_1(t + \Delta T) = -\alpha c e^{cd(t+\Delta T)} \dot{d}(t + \Delta T) \\ \ddot{x}_1(t + \Delta T) = \ddot{x}_1(t) + \Delta T \ddot{x}_1(t) \end{cases} \quad (35)$$

Arrêt quand  $t + \Delta T = t_0$ .

Ces estimations permettent de calculer l'inter-distance de sécurité dans la stratégie à taux de freinage fini :

$$d_{safe2} = d_c + \int_0^{t_0} (-\alpha e^{cd}) dt +$$

$$(\beta - \dot{x}_2(0))t_0 + \frac{B_{max2}}{2}t_0^2 +$$

$$\frac{(\alpha + \dot{x}_1(t_0))^2}{4B_{max1}} \ln \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(t_0)}{\alpha} \right)$$

# Annexe B

## Détermination de la décélération maximale dans l'approche à taux de freinage infini

l'accélération du véhicule suiveur est contrôlée suivant la loi :

$$\ddot{x}_1 = -\alpha c e^{cd} \dot{d}, \quad (36)$$

ce qui permet d'écrire l'accélération de pénétration de la manière suivante :

$$\ddot{d} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2 = -\alpha c e^{cd} \dot{d} - \ddot{x}_2 \quad (37)$$

Il s'en suit par intégration la relation suivante exprimant la vitesse de pénétration :

$$\dot{d} = -\alpha e^{cd} + \beta - \dot{x}_2, \quad (38)$$

où  $\beta = \alpha + \dot{x}_1(0)$ .

En dérivant l'accélération du véhicule suiveur par rapport au temps, l'on obtient la relation suivante ;

$$\frac{d\ddot{x}_1}{dt} = -\alpha c^2 e^{cd} \dot{d}^2 + \alpha^2 c^2 e^{2cd} \dot{d} \quad (39)$$

Cette accélération est minimale lorsque  $\frac{d\ddot{x}_1}{dt} = 0$ , ce qui conduit à une distance de pénétration  $d^*$  vérifiant la relation suivante :

$$\dot{d}^* = \alpha e^{cd^*} \quad (40)$$

On considère le cas extrême où le véhicule leader est à l'arrêt :  $\dot{x}_2 = 0$ . Etant donné que  $d^*$  vérifie l'équation 38, on a l'égalité suivante :

$$\dot{d}^* = -\alpha e^{cd^*} + \beta = \alpha e^{cd^*}, \quad (41)$$

d'où

$$e^{cd*} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right), \quad (42)$$

En substituant  $e^{cd*}$  dans la relation (36), on obtient la valeur minimale de l'accélération ;

$$a_{min} = \dot{x}_1(d*) = -\alpha c \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \left( \alpha \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right) \right) \quad (43)$$

Ainsi, obtient-on :

$$a_{min} = -\frac{\alpha^2 c}{4} \left( 1 + \frac{\dot{x}_1(0)}{\alpha} \right)^2 \quad (44)$$

# Annexe C : Publications

## **Revue à comité de lecture (acceptée)**

F.H. Somda, H. Cormerais, J. Buisson, “Intelligent Transportation Systems : A Safe, Robust, and Comfortable Strategy for Longitudinal Monitoring“, IET Intelligent Transport Systems, acceptation 11 février 2009, archivage 20 mai 2009.

## **Revue à comité de lecture (soumis)**

F.H. Somda, H. Cormerais, J. Buisson, “Safe, Auto-Adaptive, and Stop&Go Consistent Strategies for Intelligent Cruise Control“, IET Intelligent Transport Systems, soumis le 6 juillet 2009.

F.H. Somda, H. Cormerais, O. Lafond, L. Le Coq, M. Himdi, B. Fuchs “Using Scanning Radars in ICC Applications“, IET Intelligent Transport Systems, soumis.

## **Conférences internationales**

F.H. Somda, H. Cormerais, J. Buisson, “A New, Safe, and Robust Strategy for Automotive Cruise Control“, 7th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, 4-6 June 2008, Geneva.

F.H. Somda, H. Cormerais, “Extraction de données visant à caractériser les situations de conduite pour l’amélioration de la sécurité“, Congrès International ATEC-ITS France 2009, Versailles, 4 et 5 Février 2009.

F.H. Somda, H. Cormerais, “Excellent String Stability Property for a Safe Longitudinal Control“, 16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Stockholm, 21-25 September 2009.

F.H. Somda, H. Cormerais, “Traffic Data Extraction for Road Safety Improvement“, 16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Stockholm, 21-25 September 2009.

F.H. Somda, O. Lafond, L. Le-Coq, M. Himdi, “RCS Measurement Procedure and Distribution for Automotives in the Context of ITS“, 9th International Conference on ITS Telecommunication, Lille (France), 20-22 October 2009.

# Table des figures

1	<i>Processus de l'intelligence véhiculaire . . . . .</i>	14
1.1	<i>Capteurs pour le contrôle automobile [3] . . . . .</i>	16
1.2	<i>détection de cible par radar bistatique . . . . .</i>	20
1.3	<i>Visualisation des impulsions émise et reçue pour l'évaluation de la distance radar-cible . . . . .</i>	23
1.4	<i>Architecture d'un radar CW . . . . .</i>	24
1.5	<i>Modulation FM associée à une émission CW . . . . .</i>	24
1.6	<i>Synoptique d'un radar FM-CW . . . . .</i>	25
1.7	<i>Détection d'obstacles mouvants par radar MTI [10] . . . . .</i>	26
1.8	<i>Principe d'un radar ACC [11] . . . . .</i>	26
1.9	<i>Diagramme de l'antenne à 24 GHz [14] . . . . .</i>	27
1.10	<i>Architecture radar ACC Doppler-pulsé [15] . . . . .</i>	28
1.11	<i>Module radar ACC Doppler-pulsé [15] . . . . .</i>	28
1.12	<i>Système monopulse d'amplitude [9] . . . . .</i>	31
1.13	<i>Système monopulse de phase [9] . . . . .</i>	32
1.14	<i>Principe du balayage électronique [9] . . . . .</i>	33
1.15	<i>Communications inter-véhiculaire en environnement coopératif [31] . . . . .</i>	37
1.16	<i>Communications véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure [32] . . . . .</i>	37
1.17	<i>processus général d'intervention de systèmes automatisés . . . . .</i>	38
1.18	<i>Angle visuel et espacement vus par le conducteur . . . . .</i>	42
1.19	<i>Système d'inférence floue . . . . .</i>	45
2.1	<i>Système dans l'état libre . . . . .</i>	54
2.2	<i>Système dans l'état contraint . . . . .</i>	54
2.3	<i>Interaction entre l'état non contraint et l'état contraint . . . . .</i>	55
2.4	<i>Inter-distance de la stratégie vs inter-distance de la stratégie à temps constant et inter-distance du modèle de Martinez. . . . .</i>	58
2.5	<i>Variation de la dynamique du véhicule suiveur en fonction du temps . . . . .</i>	59
2.6	<i>Variation de la dynamique du suiveur en fonction du temps. vitesse initiale <math>v_0 = 30\text{m/s}</math>. le leader circulant à la vitesse constante de <math>20\text{m/s}</math>. . . . .</i>	61
2.7	<i>Comportement face aux commutations fréquentes entre les phases 1 et 2 . . . . .</i>	62

2.8	<i>Accélération du suiveur en fonction de la distance de pénétration <math>d</math>. Le leader est supposé à l'arrêt.</i>	63
2.9	<i>Jerk du suiveur en fonction du temps, pour différentes vitesses du leader.</i>	64
2.10	<i>Accélération dérivant de la stratégie vs accélération de la stratégie Martinez.</i>	65
2.11	<i>Jerk de la stratégie vs jerk de la stratégie Martinez.</i>	65
2.12	<i>Stop&amp;Go en milieu non bruité</i>	67
2.13	<i>Stop&amp;Go en milieu bruité</i>	68
2.14	<i>Robustesse de la stratégie face aux erreurs constantes et proportionnelles sur la mesure de <math>d</math>.</i>	70
2.15	<i>Robustesse de la stratégie face aux erreurs de mesure proportionnelles à <math>\dot{d}</math></i>	71
2.16	<i>Robustesse de la stratégie face aux erreurs de mesure doubles sur <math>d</math> et <math>\dot{d}</math>.</i>	72
2.17	<i>Influence du paramètre <math>\alpha</math> sur la stratégie de contrôle.</i>	73
2.18	<i>Influence du paramètre <math>c</math> sur la stratégie</i>	74
2.19	<i>Variation de <math>\alpha_{opt}</math> et <math>c</math> en fonction de la vitesse initiale du suiveur.</i>	75
2.20	<i>Variation de <math>\alpha_{mod}</math> en fonction de l'inter-distance désirée</i>	77
2.21	<i>Variation de la vitesse du véhicule leader lors d'un arrêt à taux de freinage maximal</i>	78
2.22	<i>La stratégie à taux de freinage fini réduit l'inter-distance de sécurité.</i>	80
2.23	<i>Les stratégies de contrôle proposées conviennent contre les bouchons.</i>	81
2.24	<i>Zones sûres et dangereuses pour la condition initiale, <math>\alpha = 10m/s^2</math>, <math>B_{max1} = 10m/s^2</math>.</i>	82
3.1	<i>Une chaîne de trois véhicules [75]</i>	85
3.2	<i>Instabilité de la conduite manuelle : temps de réaction identiques</i>	94
3.3	<i>Instabilité de la conduite manuelle : temps de réaction aléatoires</i>	94
3.4	<i>Effet oscillatoire induite par la perturbation</i>	95
3.5	<i>Stabilité de la politique ACC proposée pour la perturbation</i>	96
3.6	<i>Une conduite sans oscillations</i>	97
3.7	<i>Instabilité de la conduite manuelle</i>	98
3.8	<i>La stratégie ACC maintient la chaîne sable</i>	98
3.9	<i>Résistance à la perturbation d'un environnement mixte, ACC régulièrement disposés, <math>n=101</math> véhicules</i>	100
3.10	<i>Résistance à la perturbation d'un environnement mixte, ACC aléatoirement disposés, <math>n=101</math> véhicules</i>	101
3.11	<i>Marge de stabilité pour la perturbation décrite</i>	102
3.12	<i>Stabilité d'un trafic mixte à la limite de la marge de stabilité</i>	103
3.13	<i>Marge pour la seconde perturbation</i>	104
4.1	<i>configuration route droite</i>	109
4.2	<i>Illustration de <math>dx</math> et <math>d\alpha</math></i>	110
4.3	<i>Illustration d'une route courbe</i>	112



4.4	<i>Influence du dépointage de faisceau sur la visibilité</i>	113
4.5	<i>Scénario avec <math>\delta &gt; \gamma</math></i>	114
4.6	<i>Arrière de véhicule utilisé pour la simulation</i>	118
4.7	<i>Distribution de SER obtenue par simulation</i>	118
4.8	<i>Mesure de SER : configuration</i>	119
4.9	<i>Distribution de SER pour une Ford Focus Break</i>	121
4.10	<i>Distribution de SER pour une Peugeot 206</i>	122
4.11	L'antenne-lentille [85]	123
4.12	<i>Diagramme de rayonnement de l'antenne-lentille</i>	124
4.13	Le pouvoir de dépointage de l'antenne	125
4.14	<i>Diagrammes de rayonnement dépointés de l'antenne-lentille pour une translation de 5 mm de la source dans un sens</i>	125
4.15	<i>Le dépointage accroît la distance de détection</i>	127
4.16	<i>Insuffisance de la stratégie de détection sans dépointage</i>	129
4.17	<i>Le dépointage garantit une détection sur l'ensemble de la plage angulaire de détection</i>	130
4.18	<i>Scénario d'insertion d'un véhicule dans une file [70]</i>	134

# Liste des tableaux

1.1	Performances de la détection par caméra . . . . .	17
1.2	Performances de la détection par infrarouge . . . . .	17
1.3	Performances de la détection par ultrasons . . . . .	18
1.4	Performances de la détection par lidar . . . . .	18
1.5	Performances de la détection par radar . . . . .	29
4.1	Spécifications du système de mesure de SER . . . . .	120
4.2	L'opération de dépointage augmente le gain . . . . .	126

# Bibliographie

- [1] Willie D. Jones, "Keeping Cars from Crashing", IEEE Spectrum, vol.38, issue 9, pp.40-45, September 2001.
- [2] Alexandre REVUE, Fawzi NASHASHIBI, "Contribution des systèmes d'informations géographiques à la sécurité routière : Approche multicateurs pour l'évaluation de configurations à risques", Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, Mai 2003.
- [3] [http://www.calccit.org/itsdecision/serv\\_and\\_tech/AVCSS-section-one/parking.html](http://www.calccit.org/itsdecision/serv_and_tech/AVCSS-section-one/parking.html)
- [4] Laurin E., "Système intelligent d'assistance à la perception dans la conduite de véhicule", Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique ; Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Québec Canada, 26 Janvier 2000.
- [5] J.P. Artis, S. Kemkemian, "The Radar in the Automotive Domain", Annals of Telecommunications, vol.60, no.3-4, pp.326-356, Mars/Avril 2005.
- [6] Naoyuki Yamada, "Three-dimensional High Resolution Measurement of Radar Cross Section for cars in 76 GHz Band"  
source [http://www.tytlabs.co.jp/english/review/rev362epdf/e362\\_064yamada.pdf](http://www.tytlabs.co.jp/english/review/rev362epdf/e362_064yamada.pdf)
- [7] Ralph Mende, Marc Behrens and Stephan Milch, "A 24 GHz ACC Radar Sensor", 2008,  
[http://www.smart-microwave-sensors.de/A\\_24GHz\\_ACC\\_Radar\\_Sensor.pdf](http://www.smart-microwave-sensors.de/A_24GHz_ACC_Radar_Sensor.pdf)
- [8] Naoyuki Yamada, "Radar Cross Section for Pedestrian in 76 GHz Band", research report, R&D Review of Toyota CRDL, vol. 39 no.4.
- [9] Eddy Jehamy, "Contribution à la Synthèse d'antennes focalisantes pour applications en bande millimétrique", Thèse de doctorat de l'université de Brest, 2005.
- [10] M. L. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", 2nd Edition, New York : Mc-Graw-Hill, 1980.
- [11] [http://www.motorsportscenter.com/printer\\_67.shtml](http://www.motorsportscenter.com/printer_67.shtml), consulté le 17 août 2009.
- [12] H.P. Groll et J. Detlefsen, "History of Automotive Anticollision Radars and Final Experimental Results of MM-Wave Car Radar Developed by the technical University of Munich", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 12, no. 8, pp. 15-19, August 1997.
- [13] Electronic Communications Committee, "ECC Decision of 12 November 2004 on the frequency band to be designated for the temporary introduction of automotives Short Range Radars (ECC/DEC/(04)10)"  
<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCDEC0410amended.PDF> consulté le 18 août 2009.

- [14] Marc-Michael Meinecke, Raimond Holze, Marc Gonter, Thomas Wohllebe, Ralph Mende, Rajko Petelka, "A Side-Pre-Crash Sensing System for Automotive Vehicle Height Level Adaptation", 3rd International Wprkshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg, Germany, March 2006.
- [15] Gresham, I. ; Jain, N. ; Budka, T. ;Alexanian, A. ; Kinayman, N. ; Ziegner, B. ; Brown, S. ; Staecker, P. : "A 76-77 GHz Pulsed-Doppler cadar module for autonomous cruise control applications ", Microwave Symposium Digest., 2000 IEEE MTT-S International, 2000, (3), pp.1551-1554
- [16] Vincent Lemonde et Michel Devy , "Détection d'obstacles par stéréovision sur véhicules intelligents", Congrès annuel des doctorants de l'école doctorale système de Toulouse, mai 2004
- [17] Okada, Ryuzo and Taniguchi, Yasuhiro and Furukawa, Kenji and Onoguchi, Kazunori , "Obstacle Detection Using Projective Invariant and Vanishing Lines", 9th IEEE International Conference on Computer Vision, Nice (France) (ICCV), October 2003
- [18] M. Junaid Khan, Danya Yao, Juan Zhao, Shuning Wang, and Yu Cai, "Intelligent Vehicle Control by Optimal Selection of Image Data", International conference on Intelligent computing, ICIC 2006, Kunming, China, August 16-19, 2006
- [19] Darricau (J.)., "Physique et théorie du radar", Edition SODIPE (1993-1994).
- [20] J. Butler and R. Lowe, "Beam Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas", Electronic Design, pp.170-173, April 1961.
- [21] P. M. Relph, "An Electronically Scanning Antenna for Automotive radar Systems ", IEE Colloquium on Automotive Radar and Navigation Techniques (Ref. No. 1998/230), London (UK), february 1998.
- [22] Mikael Persson, Frederic Botling, Erik Hesslow, "Stop & Go Controller for Adaptive Cruise Control", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications Kohala Coast-Island of Hawai'i, Hawai'i, USA. August 22-27,1999
- [23] P. Venhvens, K. Naab and B. Adiprasito, "Stop and go cruise control", in Proc. FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, 2000.
- [24] Marie Claire Naima Raynal "Vehicle to Vehicle and Vehicle to Infrastructure communication ", report, Aalborg University, August 2007. <http://www.ece.fr/~raynal/main.pdf>
- [25] M. Heddebaut, V. Deniau, K. Adouane, "In-vehicle WLAN radio-frequency communication characterization ", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.5, issue 2, pp.114-121, June 2004.
- [26] van Arem, B. van Driel, C.J.G. Visser, R. "The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.7, issue 4, pp. 429-436, december 2006.
- [27] X. Yang, L. Liu, N. H. Vaidya, F. Zhao "A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning ", Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on In Mobile and Ubiquitous Systems :The First Annual International Conference on Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. (2004), pp. 114-123.

- [28] [http://archive.autonews.fr/fr/cmc/dossiers/200713/communications-v2v-et-v2i\\_8367.html](http://archive.autonews.fr/fr/cmc/dossiers/200713/communications-v2v-et-v2i_8367.html) vu le 07 juillet 2009
- [29] <http://www.worldcarfans.com/10510278356/general-motors-develops-vehicle-to-vehicle-communication> consulté le 07 juillet 2009
- [30] Caitlin Motsinger and Todd Hubing "A Review of Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Initiatives ", Technical report of the Clemson University Vehicular Electronics Laboratory, October 2007. <http://www.cvel.clemson.edu/pdf/CVEL-07-003.pdf>
- [31] <http://www.transportation1.org/lanedeparture/future.html>, consulté le 17 août 2009
- [32] [http://www.ece.osu.edu/~ekici/res\\_ivc.html](http://www.ece.osu.edu/~ekici/res_ivc.html), consulté le 17 août 2009.
- [33] "State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part I – Journal of Systems & Control Engineering ; Vol. 215 Issue 4, p283-303, 2001.
- [34] Pipes, "An Operational Analysis of Traffic Dynamics" Journal of Applied Physics, vol.24, no.1, 274-287, 1953.
- [35] Leutzbach, W., "An introduction to the theory of traffic flow", Springer-Verlag, Berlin,1988.
- [36] Jepsen, M., "On the Speed-Flow Relationships in Road Traffic : A Model of Driver Behaviour" Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity, 297-319, Copenhagen, Denmark, 1998.
- [37] Braskstone M and McDonald M., "Car following : a historical review, transportation research part F.2 ", Pergamon, pp 181-196, 2000
- [38] Chien C. and Ioannou P., "Automatic Vehicle-Following", Proceeding of American Control Conference 1992, Chicago, IL, pp.1748-1752.
- [39] John-Jairo Martinez Carlos Martinez, "A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scénarios", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.15, issue 2, pp.246-258, Feb. 2007.
- [40] Chandler, R.E., R. Herman, and E.W. Montroll, "Traffic Dynamics : Studies in car following". Operations Research 6, pp. 165-184, 1958.
- [41] Gazis, D.C., R. Herman, and R.W. Rothery, " Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow". Operations Research 9, 545-567, 1961.
- [42] Edie L., "Car Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic." Operation Research, vol.9, no.1, , pp.66-76, January-February 1961 published by INFORMS. <http://www.jstor.org/pss/167431>
- [43] Wiedemann, R., "Simulation des Straßenverkehrsflusses". Technical Report, Institute for Traffic Engineering, University of Karlsruhe (in German), 1974.
- [44] Fancher P., Bareket Z., Ervin R., "Human-Centered Design of an Acc-With-Braking and Forward Crash Warning System." Vehicle System Dynamics, vol.36, no.2-3, pp.203-22-, 2001.
- [45] Nagel, K., " Particle Hopping Models and Traffic Flow Theory", Physical Review E 53, 4655-4672, 1996.

- [46] Nagel, K., "From Particle Hopping Models to Traffic Flow Theory", *Transportation Research Record* 1644, 1-9, 1998.
- [47] Nagel, K., P. Simon, M. Rickert, and J. Esser, "Iterated Transportation Simulation for Dallas and Portland". In : Brilon, Huber, Scheckenberg, and Wallentowitz (eds), *Traffic and Mobility : Simulation, Economics, Environment*. Springer-Verlag, 1999.
- [48] Wu, N., and W. Brilon, "Cellular Automata for Highway Traffic Flow Simulation". In : Ceder, A. (ed), *Proceedings 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (Abbreviated presentations)*, 1-18, 1999.
- [49] Yilmaz Hatipkarasulu "A Variable Response Time Lag Module for Car Following Models Using Fuzzy Set Theory", PHD, Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College ,2002.
- [50] Xiaoliang Ma, "OA Neural-Fuzzy Framework for Modeling Car-Following Behavior", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2006. SMC '06.
- [51] E.H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp.1, 1975.
- [52] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. 15, pp. 116-132, 1985.
- [53] Kikuchi, C., and P. Chakroborty, "Car Following Model Based on Fuzzy Inference System." *Transportation Research Record*,1992, 1365, pp. 82-91.
- [54] Inokuchi, H., S. Kawakami, H. Ogino, K. Noda, and Y. Kurimoto "The Car Following Models with the Consideration of the Driver's Attribute.", *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Totonto, Canada, 1999.
- [55] Muller, R.; Nocker, G., "Intelligent cruise control with fuzzy logic", *Proceedings of the Intelligent Vehicles apos ;92 Symposium.*, pp. 173-178, 1992.
- [56] R. Abdullah, A. Hussain, K. Warwick and A. Zayed, "Autonomous intelligent cruise control using a novel multiple-controller framework incorporating fuzzy-logic-based switching and tuning ", *Neurocomputing Volume 71, Issues 13-15, August 2008, Pages 2727-2741*.
- [57] Sang-Jin Ko, Ju-Jang Lee, "Fuzzy logic based adaptive cruise control with guaranteed string stability ", *Control, International Conference on Automation and Systems*, 2007. ICCAS apos ;07, 17-20 Oct. 2007 Page(s) :15-20.
- [58] Algers, S., E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox and J.-F. Gabard, "Review of Micro-Simulation Models". Review Report of the SMARTTEST project; deliverable 3, 1997. (<http://www.its.leeds.ac.uk/smartest/deliv3.html>)
- [59] Barceló J., J. Casas, J.L. Ferrer, and D. García, "Modelling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators : The Case with AIMSUN2". In : Brilon, Huber, Scheckenberg, and Wallentowitz (eds), *Traffic and Mobility : Simulation, Economics, Environment*. Springer-Verlag, 1999.
- [60] Vermijs, R.G.M.M., Papendrecht, H.J., Lutje Spelberg, R.F., and Toetenel, W.J., "Short term forecasting of the level of service on a motorway network, by using a

- microscopic simulation model". Proceedings of the 2nd Erasmus-Network conference on transportation and traffic engineering, Kerkrade, 1995.
- [61] Caudill, R. J. and Garrard, W. L, "Vehicle-Follower Longitudinal Control for Automated Transit Vehicles", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 241-248 December 1977
- [62] S. Shladover, "Longitudinal Control of Automotive Vehicles in Close-Formation Platoons", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol.113, pp.231-241, 1991.
- [63] Chi-Ying Liang and Huei Peng, "String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles", *Pioneering International Symposium on Motion and Vibration Control in Mechatronics (MOVIC in Mechatronics)*, Tokyo , JAPON (05/04/1999) 2000, vol. 43, no 3, pp. 611-761
- [64] Ioannou P. and Chien C., "Autonomous Intelligent Cruise Control", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 42, no.4, pp. 657-672, 1993.
- [65] D. Swaroop, J.K. Hedrick, "String Stability of Interconnected Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 41, no. 3, pp. 349-356, March 1996.
- [66] S. Shladover, "An overview of the automated highway systems program", *Vehicle System Dynamics*, vol.24, pp. 551-595, 1995.
- [67] S. Sheikholeslam and C.A. Desoer, "Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles", *Proc. of American Control Conference*, San Diego, 1990, pp. 243-246.
- [68] J. Zhou and H. Peng, "String Stability Conditions of Adaptive Cruise Control Algorithm", in *IFAC Symp. on Advances in Automotive Control*, Salerno, Italy, 2004.
- [69] J.K. Hedrick, V.K. Narendran, K.S. Chang, "Transitional Platoon Maneuvers in an Automated Highway System", *California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley*, december 1992.
- [70] Jing Zhou, Huei Peng, "Range Policy of Adaptive Cruise Control Vehicles for Improved Flow Stability and String Stability", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, issue 2, pp. 229-237, June 2005.
- [71] P. Lopez et A. S. Nouri, "Théorie élémentaire et pratique de la commande par les régimes glissants", *Springer Berlin Heidelberg*, vol.55, pp.3-23, septembre 2006.
- [72] Peter A. Cook, "Stable Control of Vehicle Convoys for Safety and Comfort ", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.52, issue 3, pp. 526-531, March 2007.
- [73] X. Moreau, O. Altet, and A. Oustaloup , "The CRONE Suspension : Management of the Dilemma Comfort-Road Holding ", *Nonlinear Dynamics*, vol.38, no.1-4, pp.461-484, December 2004.
- [74] John-Jairo Martinez Molina, "Commande de l'inter-distance entre deux véhicules", thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 2005.
- [75] J.J.C. van Schendel, "Stability Analysis for a String of Automated Guided Vehicles", student report, Department of Mechanical Engineering, TU Eindhoven, September 2006.
- [76] Ming Yang, Bin Dong, Hong Wang, Bo Zhang, " Laser radar based real-time ego-motion estimation for intelligent vehicles ", *IEEE Symposium on Intelligent Vehicle*, vol.1, pp. 44-51, June 2002.

- [77] Ganci, P.; Potts, S.; Okurowski, F. , “A forward looking automotive radar sensor ”, Proceedings of the Intelligent Vehicles '95 Symposium., Detroit, USA, September 1995
- [78] <http://www.tmworld.com/article/CA214128.html>, consulté en Avril 2009
- [79] I. Gresham, N. Jain, T. Budka, A. Alexanian, N. Kinayman, B. Ziegner, S. Brown, P. Staecker "A Compact Manufacturable 76-77GHz Radar Module for Commercial ACC Applications", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp.44-58, vol.49, issue 1, january 2001.
- [80] Luz Elena Y. Mimbela and Lawrence A. Klein, "A summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems", sponsored by US department of Transportation, 2000.
- [81] Naoyuki Yamada : “Three Dimensional High Resolution Measurement of Radar Cross Section for Car in 76 GHz Band ”, R&D Review of Toyota CRDL, vol.36 No.2, June 2001. <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tvtw/vdstits.pdf>
- [82] F.H. Mitchell, Jr., W.R. Mahaffey, R.F. Jacob " Modeling Plasma Effects on Radar Cross Section of Reentry Vehicles" , IBM Journal of Research and Development, vol.13, no.4, pp. 468, 1969.
- [83] Richard O. Lane “Estimating Radar Cross Section using Bayesian Image Restoration” Proceedings of the London Communications Symposium, pp.1-4, 8-9 September 2003.
- [84] O. Lafond, B. Fuchs, S. Palud, M. Caillet, M. Himdi, S. Rondineau, L. Le Coq “Reconfigurable antenna in mm-waves based on stratified lens and sources array”, EUCAP 2009, European Conference on Antennas and Propagation, Berlin
- [85] B. Fuchs "Lentilles Stratifiées et Sources Réelles Associées-Analyses Théoriques et Validations Expérimentales en Ondes Millimétriques" , thèse de doctorat de l'université de Rennes1, Novembre 2007.
- [86] D. Swaroop and K.R. Rajagopal, "Intelligent cruise control systems and traffic flow stability", source : Transportation Research Part C : Emerging Technologies vol.7, no.6, pp. 329-352, December 1999 published by Elsevier.



# Développement de stratégies de commande et de perception pour une régulation de vitesse intelligente

Les conditions actuelles de transport démontrent par elles-mêmes l'urgence qu'il y a à intervenir dans la sécurisation des routes par des moyens autres que purement repressifs. Le recours aux véhicules intelligents dotés de technologies de perception et de commande avancées, capables de prendre en charge, au moins en partie, certaines tâches de conduite, semble justifier ce point de vue. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la gestion de l'inter-distance véhiculaire pour assurer la sécurité et le confort des passagers. Pour ce faire, nous proposons une stratégie de commande basée sur un modèle d'accélération non linéaire de type exponentiel robuste et compatible aussi bien avec les applications de régulation de vitesse intelligente (ACC) qu'avec les applications Stop&Go. Nous proposons également, une stratégie de détection par dépointage de faisceau d'antenne qui augmente sensiblement la distance de détection et permet l'identification de scénarios du trafic routier, toutes choses importantes pour la mise en œuvre d'une stratégie de commande efficace.

## Monitoring and perception strategies design for intelligent cruise control

Today's traffic conditions call for the event of Intelligent Transportation Systems for road safety improvement. In Intelligent vehicles driven by such technologies, at least, part of the driving task is managed by embedded systems. In this thesis report, we manage the inter-vehicular spacing to ensure passengers' safety and comfort. Therefore, we offer a new longitudinal control strategy based on a nonlinear, second order, and exponential profile model. The approach is robust and consistent with Intelligent Cruise Control as well as Stop&Go applications. We also propose a detection approach based on an antenna beam scanning strategy that drastically improves distance of detection and enables identification of traffic scenarios. Such results are essential for an efficient longitudinal control strategy design.