

Thèse de Doctorat

Alan ALI

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences et technologies de l'information et de la communication (STIM)

Discipline : Automatique, productique et robotique.

Unité de recherche : Institut de Recherche en Communication
s et Cybernétique de Nantes (IRCCyN)

Soutenue le 21/ 09/ 2015

Modélisation et commande d'un convoi de véhicules urbains

Modeling and control of a platoon of urban autonomous vehicles

JURY

Rapporteurs :

M. Fawzi NASHASHIBI, Directeur de recherche, INRIA (Paris-Rocquencourt)
M. François CHARPILLET, Directeur de recherche, LORIA-INRIA (Nancy)

Examineurs :

M. Benoît THUILOT, Maître de conférences, Institut Pascal (Clermont-Ferrand)
M. Philippe BONNIFAIT, Professeur, Université de Technologie de Compiègne, Heudiasyc (Compiègne)
M. Wisama KHALIL, Professeur, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Nantes)

Directeur de Thèse :

M. Philippe MARTINET, Professeur, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Nantes)

Co-encadrant de Thèse :

M. Gaëtan GARCIA, Maître de conférences, Ecole Centrale de Nantes (Nantes)

Résumé

La conduite de véhicules automatisés en convoi, sur l'autoroute comme en milieu urbain, est une voie prometteuse car elle permet de diminuer la distance entre les véhicules, de réduire la consommation et d'améliorer la sécurité routière et la fluidité du trafic.

La commande d'un convoi comprend une commande longitudinale et une commande latérale. Les stratégies les plus répandues pour la commande longitudinale en convoi sont l'espacement variable et l'espacement constant. La stratégie d'espacement variable ne requiert pas beaucoup d'informations (position, vitesse...) en provenance des autres véhicules, et la stabilité du convoi peut être assurée en utilisant des capteurs embarqués simples. Par contre, les distances inter-véhicules peuvent devenir très grandes à vitesse élevée. La stratégie d'espacement constant entre les véhicules peut assurer la stabilité du convoi avec une densité de trafic élevée, mais elle requiert que chaque véhicule reçoive (à haut débit) des informations, au minimum en provenance du leader, ce qui demande un système de communication très fiable, faute de quoi le convoi peut devenir instable.

Dans les travaux de cette thèse, une nouvelle loi de commande qui cumule les avantages des deux stratégies précédentes est proposée. Un modèle original pour la dynamique longitudinale du convoi est développé. Ce modèle permet de découpler la dynamique "lente" du trafic et du convoi de la dynamique "rapide" des véhicules. Ceci permet de diminuer largement les distances inter-véhicules, en gardant la stabilité, la sécurité et la robustesse. Il suffit pour cela de partager une seule information entre les véhicules, à un faible débit. Ce modèle général permet de retrouver les autres lois existantes, et de basculer de l'une à l'autre selon l'état (disponibilité) de la communication. La robustesse de la loi de commande proposée est vérifiée en trouvant les conditions de stabilité et de sécurité des convois homogènes et non-homogènes en présence de retards non-identiques (actionnement, capteurs, communication)

Pour le convoi urbain, un modèle mixte dynamique-cinématique a été choisi pour les dynamiques longitudinale et latérale du véhicule. Ce modèle est la première brique vers un modèle (dynamique-cinématique étendu) qui permet de prendre en compte les glissements. Le couplage entre les deux dynamiques a été traité. La commande latérale a été réalisée en utilisant une commande robuste par mode glissant.

La vérification a été faite sur Matlab et TORCS ¹. La stabilité et la sécurité ont été vérifiées, sur autoroute et en milieu urbain, en prenant en compte des scénarios critiques. Les bons résultats obtenus montrent l'efficacité de la loi de commande proposée.

¹TORCS : The Open Racing Car Simulator

Abstract

Moving automated vehicles in platoon, on highway and in urban areas, seems to be a promising idea, because it reduces the inter-vehicles distances, reduces fuel consumption, improves transport safety and traffic congestion.

Variable spacing and constant spacing are the two policies for the longitudinal control of platoons. Variable spacing doesn't require a lot of data (position, speed...) from other vehicles, and string stability can be obtained using on-board information only. However, inter-vehicle distances are very large, and hence traffic density is low. Constant spacing offers string stability with high traffic density, but it requires high rate and regular data communication between the vehicles (at least from the leader). So it requires highly reliable communication systems, otherwise the system may become unstable.

A new model and control law are proposed for the longitudinal dynamics of the platoon. The new model enables decoupling the "slow" dynamics of the platoon as a whole from the "fast" dynamics of inter-vehicle movements. This widely reduces the distances between vehicles, while maintaining stability, security and robustness. It only requires sharing one information between the vehicles at a low rate. It also represents a general law from which we can derive other important laws; this gives a framework which allows smooth switching between these laws according to communication capability without losing stability. The robustness of the proposed control law has been established by finding the conditions of string stability and security of homogeneous and non-homogeneous platoons in the presences of non-identical delays (lags, sensing and communications delays), thus correcting previous statements found in the literature.

For urban platoons, a mixed dynamic-kinematic model has been chosen for the longitudinal and lateral dynamics of the vehicle, as a first step toward a dynamic-extended kinematic model that allows taking slipping into account. The coupling between the two dynamics has been treated. The lateral control was achieved using the robust sliding mode control.

The verification was done in Matlab and TORCS (a simulator developed during the thesis depending on open-source game software). The platoon was tested in the conditions simulating highways and urban areas. Stability and safety were checked in critical scenarios. The good results prove the efficiency of the proposed control law.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Abréviations	viii
Symboles	ix
Introduction générale	1
0.1 Les objectives de la thèse	2
0.2 Les contributions de la thèse	3
0.3 Organisation du mémoire	6
1 Etat de l’art	8
1.1 L’embouteillage (La problématique originale)	8
1.1.1 Définition	8
1.1.1.1 Définition courantes	8
1.1.1.2 Définition technique	8
1.1.2 La congestion du trafic en chiffres	9
1.1.3 Les stratégies pour résoudre les problèmes de congestion du trafic	10
1.1.3.1 Agrandir et développer les réseaux routiers	10
1.1.3.2 Améliorer les services sur l’infrastructure existant	11
1.1.3.3 Modulation du prix en heures de pointe	12
1.1.3.4 Ajouter plus de capacité dans des zones critiques	12
1.1.3.5 Gestion des zones de travaux	13
1.1.3.6 Information trafic pour les conducteurs	13
1.1.3.7 Réductions permanente et temporaire de la vitesse maxi- male	13
1.2 Nouveaux Modes de Transport	15
1.2.1 VIP piloté par l’usager	16
1.2.2 VIP entièrement automatisé	17
1.2.2.1 Véhicules automatisés avec infrastructure dédiée	18
1.2.2.2 Véhicules automatisé avec infrastructure non dédiée	21
1.3 Circulation en convoi	22
1.3.1 Spécifications de la circulation en convoi	22

1.3.2	Avantages du convoi	22
1.3.3	Les projets de circulation en convoi	22
1.4	conclusion	31
2	Modélisation	32
2.1	Notations	33
2.2	Modélisation du véhicule	35
2.2.1	Aérodynamique	37
2.2.2	Modèle du groupe motopropulseur	38
2.2.3	Modèle du système de freinage	40
2.2.4	Modèle de contact roues/sol et glissement	41
2.2.5	Modèle du système de direction	43
2.2.6	Modélisation du mouvement du véhicule	45
2.2.6.1	Modèle cinématique	45
2.2.6.2	Modèle dynamique	47
2.2.6.3	Modèle cinématique étendu	49
2.2.6.4	Modèle longitudinal mixte (dynamique et cinématique)	50
2.2.6.5	Couplage et découplage entre la dynamique longitudinale et la dynamique latérale	54
2.2.7	Linéarisation exacte de modèles et découplage	56
2.2.7.1	La technique de linéarisation entrée/sortie	56
2.2.7.2	Linéarisation exacte du modèle cinématique pour le com- portement latéral	61
2.2.7.3	Linéarisation exacte et découplage des modèles cinématique latéral et dynamique longitudinal	62
2.2.7.4	Linéarisation exacte de la dynamique longitudinale	65
2.3	Modélisation du Convoi	67
2.3.1	État de l'art	67
2.3.2	Modèle longitudinal proposé (convoi sur autoroute)	72
2.3.3	Un modèle des convois sur train	74
2.3.4	Modèle longitudinal proposé (pour des milieux urbains)	75
2.3.5	Modèle latéral proposé	76
2.4	Modèles de simulation	77
2.4.1	Le modèle du véhicule sous Matlab	77
2.4.2	Le modèle du véhicule dans TORCS	77
2.4.3	Conclusion	78
3	La commande du convoi	80
3.0.4	Définitions	81
3.0.4.1	Commande longitudinale	81
3.0.4.2	Commande latérale	81
3.0.5	Les objectifs de la commande du convoi	81
3.1	L'état de l'art	83
3.1.1	La commande de robots mobiles en formation	83
3.1.2	Navigation en convoi	84
3.1.3	Les stratégies de commande longitudinale du convoi	86

3.1.3.1	Commande selon la communication entre les véhicules et sa topologie	86
3.1.3.2	Commande selon la consigne de régulation des distances inter-véhicules	87
3.1.4	La commande de véhicules et les modèles utilisés	88
3.1.4.1	Utilisation du modèle cinématique du véhicule.	89
3.1.4.2	Utilisation d'un modèle dynamique du véhicule	91
3.1.4.3	Utilisation d'un modèle cinématique étendu	92
3.1.4.4	Utilisation d'un modèle dynamique-cinématique	94
3.1.4.5	Utilisation d'un modèle retenu dans le cadre de la thèse	95
3.2	Notions de stabilité et de sécurité du convoi	95
3.2.1	Définitions	95
3.2.1.1	La stabilité individuelle de chaque véhicule	96
3.2.1.2	La stabilité du convoi	96
3.2.1.3	Stabilité longitudinale du convoi	96
3.2.2	Étude de la stabilité du convoi	99
3.2.2.1	Commandes référencées sur le véhicule précédent	99
3.2.2.2	Commandes référencées sur le leader	101
3.2.2.3	Commandes référencées sur le leader et le véhicule précédent	102
3.2.2.4	Commandes référencées sur le véhicule précédent et le suivant	103
3.2.2.5	Commandes référencées sur "r" véhicules précédents	103
3.2.2.6	Commandes référencées sur toutes les autres véhicules dans le convoi	104
3.2.3	Notion de sécurité	104
3.2.3.1	Intégration de la sécurité dans les lois de commande	104
3.2.3.2	Utilisation d'un observateur	105
3.3	Les lois de commande longitudinales proposées pour les convois	106
3.3.1	La modification proposée	106
3.3.2	La loi de commande longitudinale (système du deuxième ordre)	106
3.3.2.1	Stabilité de la commande longitudinale	107
3.3.2.2	Robustesse de la commande vis-à-vis des erreurs de modélisation du moteur et des retards de détection	109
3.3.2.3	Les dynamiques ignorées du moteur et l'erreur d'espace-ment stationnaire	111
3.3.3	La loi de commande longitudinale (système du troisième ordre)	114
3.3.3.1	Stabilité de la commande longitudinale	115
3.3.3.2	Sécurité de la commande longitudinale	116
3.3.4	La loi de commande longitudinale en milieu urbain	119
3.3.5	Supervision de V	120
3.3.6	Avantages et comparaison	121
3.4	La commande latérale	122
3.4.1	Introduction de la commande robuste par mode glissant	123
3.4.2	La commande latérale proposée	125
3.5	Simulation et résultats	126
3.5.1	Comparaison avec les autres lois de commande	128
3.5.2	Résultats en conditions autoroutières	129

3.5.3	Résultats en milieu urbain	131
3.6	Conclusion	135
4	La robustesse et la sécurité	138
4.1	Les retards dans le convoi	139
4.1.1	Retards de communication	139
4.1.2	Retards des actionneurs et capteurs	140
4.2	Les systèmes de communication	141
4.3	Étude de la robustesse et de la sécurité de la loi de commande	142
4.3.1	Le modèle du véhicule en prenant en compte les retards parasites	143
4.3.2	La loi de commande et la dynamique des erreurs	144
4.3.2.1	Une modification additionnelle sur TCI classique	144
4.3.2.2	La loi de commande en prenant en compte les retards	145
4.3.3	Stabilité de la loi de commande en présence de retards	148
4.3.4	Sécurité de la loi de commande en présence de retards	152
4.4	Cas particuliers	153
4.4.1	Espacement constant	153
4.4.2	TCI modifiée	154
4.4.3	TCI classique	156
4.5	SIMULATIONS	157
4.6	Conclusion	158
5	Conclusion générale et perspectives	161
5.1	Conclusion générale	161
5.2	Les perspectives	162
	Annexes	165
A	Définitions et Rappels	165
A.1	Définitions	165
A.2	Rappel 1	167
A.3	Rappel 2	167
B	Preuves	168
C	TORCS	175
C.1	Le modèle du véhicule dans TORCS	175
	Bibliographie	184

Abréviations

VIP	V éhicule I ndividuels P ublics
TCI	T emps C onstante I nter-véhicule
INRIA	I nstitut N ational de R echerche en I nformatique et A utomatismes
INRETS	I nstitut N ational de R echerche sur les T ransports et leur S écurité
ACC	A daptive C ruise C ontrol
CACC	C o-operative A daptive C ruise C ontrol
ACHS	A utomatically C ontrolled H ighway S ystem
AVCS	A dvanced V ehicle C ontrol S ystems
IVHS	I ntelligent V ehicle H ighway S ystem
IVI	I ntelligent V ehicle I nitiative programme
AHS	A utomated H ighway S ystem
AVCS	A dvanced V ehicle C ontrol S ystems
PATH	P artners for A dvanced T ransit and H ighways
SARTRE	S afe R oad T rains for the E nvironment
PRT	P ersonal R apid T ransit
GCDC	C ooperative D riving C hallenge
V2V	V ehicle- to - V ehicle communication
V2I	V ehicle- to - I nfrastructure communication
TORCS	T he O pen R acing C ar S imulator
DARPA	D efense A dvanced R esearch P rojects A gency
ADA	A dvanced D river A ssistance system

Symboles

Pour un véhicule

x : La position du véhicule.

$v = \dot{x}$: La vitesse linéaire du véhicule,

a : L'accélération linéaire du véhicule,

$J = \ddot{x}$: L'à-coup (jerk) du véhicule,

a_{max} : L'accélération maximale,

a_{min} : La décélération maximale.

W_1 : L'entrée de la dynamique longitudinale linéarisée du véhicule.

W_2 : L'entrée de la dynamique latérale linéarisée du véhicule.

Pour les convois sur autoroute :

l_i : La distance désirée entre véhicules.

x_i : La position du i -ème véhicule.

$v_i = \dot{x}_i$: La vitesse linéaire du i -ème véhicule,

v_0 : La vitesse linéaire du leader,

$a_i = \ddot{x}_i \in [a_{min}, a_{max}]$: L'accélération linéaire du i -ème véhicule,

a_0 : L'accélération linéaire du leader,

$J_i = \ddot{\dot{x}}_i$: L'à-coup (jerk) du i -ème véhicule,

$\Delta x_i = x_{i-1} - x_i$: L'espacement entre le i -ème et le $(i - 1)$ -ème véhicule.

$e_i = x_{i-1} - x_i - l_i$: L'erreur d'espacement entre le i -ème et le $(i - 1)$ -ème véhicule.

N : Le nombre de véhicules dans le convoi,

W_{1i} : L'entrée de la dynamique longitudinale linéarisée de (i) -ème véhicule.

W_{2i} : L'entrée de la dynamique latérale linéarisée de (i) -ème véhicule.

W_0 : L'entrée de la dynamique longitudinale linéarisée du leader.

Pour les convois urbains :

l_i : La distance curviligne désirée entre véhicules.

s_i : L'abscisse curviligne du i -ème véhicule.

\dot{s}_i : La vitesse curviligne du i -ème véhicule.

$e_i = s_{i-1} - s_i - l_i$: L'erreur curviligne d'espacement entre le i -ème et le $(i - 1)$ -ème véhicule.

Divers

Afin de simplifier les équations, les termes suivantes sont définies :

Pour la fonction $g_i(t)$:

$$g_i^* = \|g_i(t)\|_\infty, \text{ et}$$

$$g^* = \max_i(\|g_i(t)\|_\infty).$$

Pour la fonction de transfert $G_i(s)$:

$$G_i^* = \|G_i(\omega)\|_\infty$$

$$G^* = \max_i(\|G_i(\omega)\|_\infty)$$

For/Dedicated to/To my...

Introduction générale

L'augmentation du nombre des voitures fabriquées dans le monde chaque année, de 39.7 millions de voitures en 1999 à 67.5 millions en 2015 ², a considérablement accru les problèmes de congestion du trafic. Des études ont été faites pour trouver des solutions au problème des embouteillages en utilisant des systèmes de transport intelligents. Parmi les idées proposées figure la conduite en convoi, c'est-à-dire plusieurs véhicules roulant à la même vitesse et respectant une certaine distance inter-véhicules. Cette proposition a les avantages suivants :

- Augmentation de la capacité du trafic (jusqu'à quatre fois).
- Diminution de la pollution atmosphérique et du bruit acoustique.
- Diminution de la consommation énergétique.
- Diminution de l'impact des collisions, car les voitures roulent avec des vitesses proches, mais également parce que la réaction d'un système automatique est plus rapide que la réaction humaine.
- Diminution de la fatigue des chauffeurs.

L'idée de conduire en convoi peut être appliquée sur autoroute comme en milieu urbain, mais peut également être utilisée dans des centres d'activités humaines ou commerciales (les aéroports, les grands supermarchés, les zoos,..) pour transporter les gens ou les marchandises de manière totalement autonome.

Plusieurs projets ont déjà porté sur les convois homogènes et non-homogènes sur autoroute (PATH, SARTRE, PROMETHEUS, CHAUFFEUR et KONVOI...) et d'autres projets de recherches sont en cours (COMPANION ³, GCDC ⁴..). Plusieurs lois de commande et modèles de convoi sont proposés. De plus, des études détaillées sur les

²OICA: 2014 Production Statistics: <http://www.oica.net/category/production-statistics/>

³COMPANION: <http://www.companion-project.eu/>

⁴GCDC: <http://www.gcdc.net/>

effets des retards ont également été réalisées. Un résultat particulier a été obtenu [1] qui constate que le convoi ne peut être stable en présence des retards (inter-véhicules) dans les informations envoyées du leader.

D'autres études ont été faites pour des convois urbains (Mobi-VIP, CRISTAL, PRAXITELE...). Ces projets ont utilisé soit un modèle cinématique simple qui ne peut pas être utilisé pour des vitesses élevées (Mobi-VIP, Cybercars2,...) soit, comme PRAXITELE, un modèle dynamique, plus complexe, pour le comportement longitudinal et un modèle cinématique ou dynamique pour le comportement latéral, selon la vitesse. Cette étude s'est toutefois concentrée sur les convois homogènes sans prise en compte de l'effet des retards.

Par conséquent, des études plus approfondies sur la commande de convois urbains devaient être menées. L'utilisation d'un modèle dynamique ou cinématique étendu devait être envisagée. Il était également opportun de trouver une loi de commande stable qui diminue les distances inter-véhicules en utilisant moins de communication. Enfin, une étude des convois non-homogènes et de l'effet des retards sur la stabilité et la sécurité était nécessaire.

0.1 Les objectives de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est la modélisation et la commande d'un convoi (4 ou 5 véhicules) roulant à 50 km/h avec une distance entre véhicules de 1 m , dans un milieu urbain, en assurant la sécurité du convoi et la robustesse de la commande. Des études supplémentaires sont faites pour les convois sur autoroute roulant à vitesse plus élevée (140 km/h), en considérant un modèle dynamique longitudinal.

Pour réaliser la commande du convoi, il faut tout d'abord choisir un modèle pour le véhicule afin d'assurer des commandes longitudinale et latérale précises avec des vitesses élevées. Le modèle cinématique ne peut pas être utilisé pour ces vitesses.

Le choix d'un modèle dynamique simple pour le comportement longitudinal a été privilégié, auquel un modèle simple du moteur a été ajouté. Pour le comportement latéral, un modèle cinématique simple négligeant les glissements a été retenu. Ce modèle pourrait être étendu pour prendre en compte les glissements [3, 4]. Cela permettrait d'atteindre notre objectif et d'étendre les environnements d'application du convoi aux environnements tout-terrains .

Puis il faut définir un modèle pour le convoi afin de modéliser des connections virtuelles entre véhicules assurant la stabilité. Ce modèle pourrait prendre en compte les

véhicules suivant et précédent (bidirectionnel) pour assurer la sécurité et pour obtenir une meilleure réponse.

La commande longitudinale doit garder la distance désirée inter-véhicules tout en assurant la stabilité et la sécurité du convoi. Il faut que cette commande soit robuste au regard des retards et délais présents dans le système. Il faut aussi éviter les faiblesses de la loi TCI classique (grandes distances inter-véhicules, erreurs d'espacement qui ne diminuent pas pour les basses fréquences) et celles de la loi d'espacement constant (obligation d'avoir des systèmes de communication très fiables).

La commande latérale doit faire suivre aux véhicules la trajectoire souhaitée et assurer la stabilité du mouvement latéral du convoi.

Pour vérifier la robustesse de la loi de commande, il faut assurer la stabilité et la sécurité du convoi en présence de retards d'actionnement, des capteurs et de communication. Il faut également étudier l'effet de la perte totale de communication sur la stabilité et la sécurité de convoi.

Pour vérifier la sécurité de convoi, il est nécessaire d'étudier des scénarios critiques en prenant en compte les paramètres maximums (accélérations, à-coup (jerk), vitesse...) en présence de retards.

Le confort des passagers doit être aussi pris en compte en limitant les accélérations et l'à-coup maximal pendant le mode normal.

Il faut développer un simulateur afin de vérifier la stabilité et la sécurité du convoi, et pour comparer les différents modèles proposés et les différentes lois de commande, mais également pour permettre la visualisation des résultats.

0.2 Les contributions de la thèse

Les étapes des travaux sont montrées figure 2, dans laquelle les **contributions** sont marquées en rouge.

Dans ce mémoire, les commandes latérale et longitudinale du convoi en milieu urbain et sur autoroute sont abordées.

Deux modèles mixtes (dynamique-cinématique) sont utilisés pour le véhicule. Le premier modèle est constitué d'un modèle dynamique pour le comportement longitudinal couplé avec un modèle cinématique pour le comportement latéral. Dans ce modèle longitudinal, toutes les forces extérieures appliquées au véhicule, ainsi que l'effet du mouvement latéral, sont pris en compte.

Le deuxième modèle est un modèle dynamique du troisième ordre pour le comportement longitudinal en prenant en compte un modèle simple pour le moteur. L'effet de la dynamique latérale a été considéré comme négligeable. Pour le comportement latéral, le même modèle que précédemment est pris.

Dans le modèle latéral, la dynamique de direction est considérée et les glissements des roues sont négligés (car les véhicules se déplacent sur des routes asphaltées, de bonne adhérence, et la vitesse maximale est inférieure à 50 km/h pour la commande dans un milieu urbain).

Pour le premier modèle du véhicule, le découplage entre les deux dynamiques (longitudinale et latérale) et la linéarisation (linéarisation exacte) des deux dynamiques sont effectués [2]. Il en résulte deux sous-systèmes linéaires. Le but principal en choisissant ce modèle est de faire le découplage et de faire le premier pas vers l'utilisation d'un modèle cinématique étendu [3, 4] pour prendre en compte les glissements. Cela permet d'étendre les plages de vitesse et les milieux d'utilisation du convoi. Pour le deuxième modèle, la linéarisation est directe et classique pour les deux dynamiques [5].

Un modèle original pour le convoi a été proposé dans le cadre de cette thèse. Le nom de ce modèle est Convoi sur Plateau (en Anglais "Flatbed Tow Truck Model") [6]. Ce modèle permet de découpler la dynamique "lente" de convoi dans son ensemble, de la dynamique "rapide" des mouvements inter-véhicules. Ceci permet de diminuer grandement les distances inter-véhicules, en préservant la stabilité, la sécurité et la robustesse [2, 6, 7]. Ce modèle ne demande de partager qu'une seule information V entre les véhicules, homogène à une vitesse, dont nous préciserons le choix ultérieurement.

Le modèle Convoi sur Plateau a aussi été généralisé pour les convois urbains en considérant que la commande latérale est stable et précise [2, 5].

Une première modification sur la loi de commande classique TCI [2, 6-8] a été proposée. La nouvelle loi (CTI modifiée) diminue grandement les distances inter-véhicules nécessaires pour assurer la stabilité, en introduisant des forces virtuelles entre les véhicules proportionnelles aux vitesses relatives (au lieu d'être proportionnelles aux vitesses absolues). Cela nécessite le partage d'une seule information V à faible débit entre tous les véhicules dans le convoi. Par conséquent, les distances entre véhicules peuvent être diminuées, sans pour autant remettre en cause la stabilité. De plus, ce changement permet d'augmenter la robustesse, d'éviter la saturation d'actionneurs et de garder la sécurité même en cas de perte totale de communication. Tout cela s'obtient malgré un petit effet négatif sur les distances, ce qui n'était pas le cas pour la TCI classique. Cette loi présente cependant la même faiblesse que le TCI classique : les erreurs aux basses fréquences ne diminuent pas le long du convoi.

Une deuxième modification de la loi CTI [9] a été proposée. Cette modification donne une loi de commande globale (CTI améliorée), à partir de laquelle il est possible d'obtenir les autres lois de commande (espacement constant, TCI classique, TCI modifiée), ce qui permet un basculement fluide entre ces lois selon l'état (disponibilité) de la communication. Cette loi élimine les faiblesses de TCI pour le convoi homogène et non-homogène, elle donne une stabilité plus forte que pour la TCI modifiée et la TCI classique. En même temps, elle ne demande pas de partager ou de communiquer d'information supplémentaire autre que V avec un débit lent et une mise à jour (à très faible débit) d'une position X calculée par chaque véhicule par intégration numérique de V . La mise à jour de X est importante seulement après une perte de communication.

Donc dans les deux cas, la communication entre véhicules n'est pas lourde, et n'est pas critique non plus, car le convoi peut basculer en mode totalement autonome et stable en l'absence de toute communication.

Une étude de la sécurité du convoi a été effectuée dans des scénarios critiques (la création du convoi, le changement de vitesse, et l'arrêt d'urgence du leader ou d'un suiveur) pour des convois homogènes [5, 6] et non-homogènes en présence de retards [9].

Une étude a été aussi faite sur l'effet de la perte totale de communication sur la stabilité et la sécurité du convoi dans des scénarios critiques. La durée maximale de la perte de communication n'entraînant pas la perte de stabilité, a été déterminée. Une solution pour basculer vers la TCI classique en conservant la stabilité a été proposée dans [8].

La robustesse des nouvelles lois de commande aux retards a été vérifiée. Les conditions de stabilité et de sécurité des convois homogènes en présence de retards identiques [9] et aussi pour un convoi non-homogène en présence de retards non-identiques, ont été établies. La possibilité d'avoir un convoi stable en présence de retards a été démontrée (contrairement à ce qui était affirmé dans la littérature). Les retards étudiés sont les retards d'actionnement, les retards des capteurs et les délais de communication.

En conséquence, les conditions de stabilité et de sécurité ont été obtenues pour les lois espacement constant, CTI classique, CTI modifiée car ils ne sont que des cas particuliers de la loi CTI améliorée [9].

A partir d'un simulateur de voitures de code open source (TORCS), un simulateur a été développé. TORCS est un jeu et un simulateur avancé, utilisé dans les milieux académiques. Il a un moteur physique sophistiqué (aérodynamique, traction, consommation de carburant...), et possède en outre un moteur 3D pour la visualisation (figure 1).



FIGURE 1: Un convoi simulé sous TORCS

Des changements dans le code ont été faits, ce qui permet de programmer un véhicule personnalisé. Il est possible de changer tous les paramètres (le modèle du moteur, les retards, les couples moteur, l'annulation totale ou sélective des forces externes, le freinage, les transitions...). Les lois de commande proposées (mono directionnelle, bidirectionnelle, avec communication et sans communication,...) sont aussi personnalisables.

Toutes les lois de commande longitudinales et latérales sont réalisées dans le code. Un convoi de 10 véhicules a été implanté dans TORCS.

0.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre I présente l'introduction de la thèse, dans laquelle la problématique est introduite. Une idée générale de la conduite en convoi est donnée. Les projets et les recherches les plus importants dans ce domaine sont présentés. Les limites des approches existantes sont discutées, justifiant ainsi les travaux de cette thèse.

Dans le chapitre II, les composants du véhicule et les forces les plus importantes qui agissent sur lui, sont présentés. Les modèles des composants sont donnés. Plusieurs modèles du mouvement du véhicule sont présentés en mettant en avant les avantages et les inconvénients de chacun. Un modèle est choisi et les perspectives de ce choix sont données.

Dans le chapitre III plusieurs stratégies de commande sont présentées. Une nouvelle loi de commande est proposée et les avantages sont discutées. Une étude de la stabilité du convoi urbain et sur autoroute est réalisée, ce qui permet d'élaborer les conditions de stabilité.

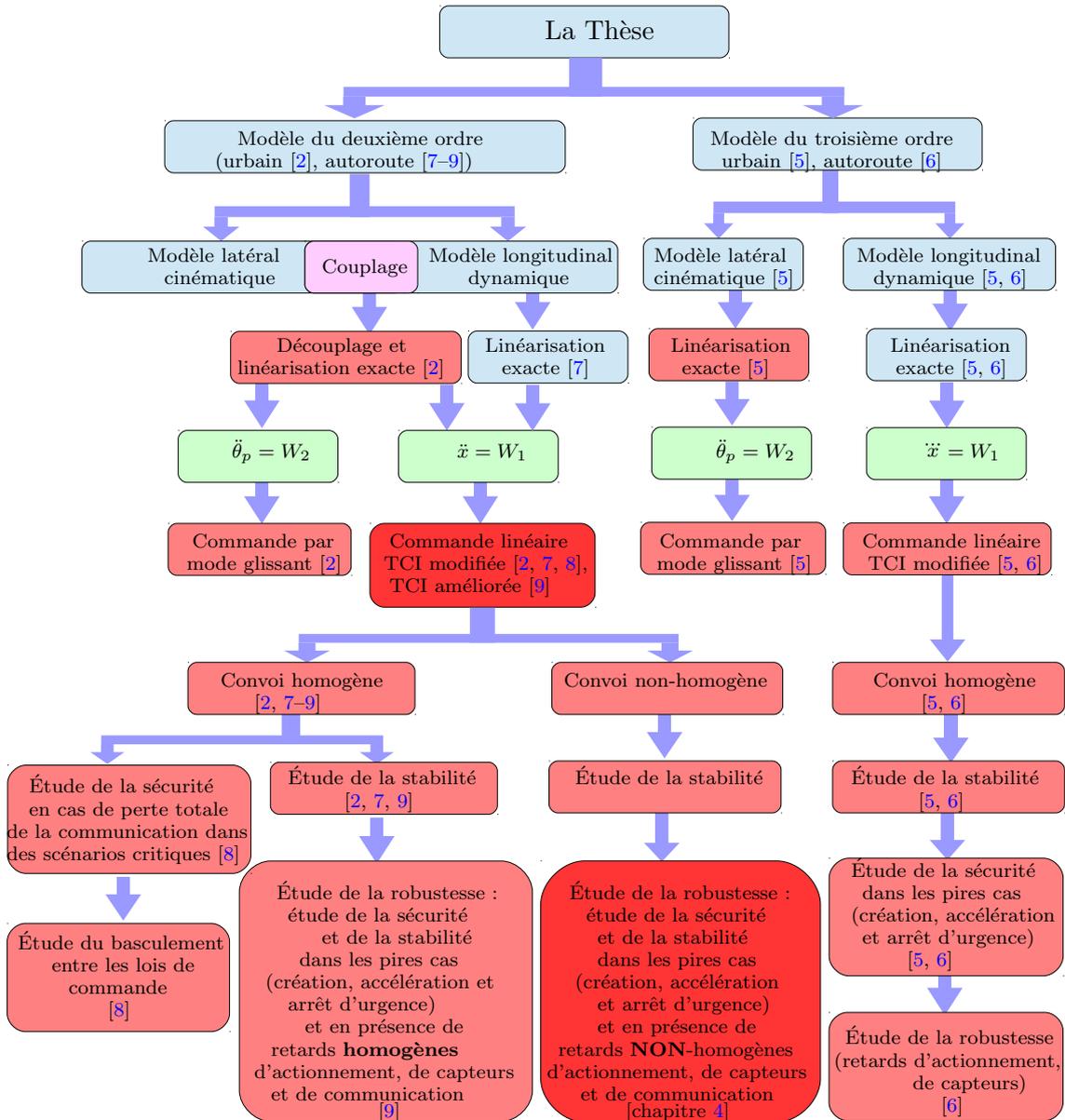


FIGURE 2: Les contributions de la thèse (en rouge clair) et les contributions les plus générales et plus importantes en rouge foncé.

Dans le chapitre IV, les études sur la robustesse des lois de commande sont présentées. Une étude pour un convoi homogène et non-homogène, en présence de retards d'actionnement, de capteurs et de communication, est faite. Des résultats intéressants sont obtenus.

Finalement, une conclusion finale sur les travaux réalisés et les perspectives sont données dans le chapitre V.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1 L'embouteillage (La problématique originale)

1.1.1 Définition

1.1.1.1 Définition courantes

L'embouteillage ou la congestion (en Canada) bouchon ou file (en Europe) est, selon le dictionnaire Larousse le mot embouteillage en général est la saturation à cause d'une trop grande affluence de personnes, d'usagers. . . ". Selon le dictionnaire d'oxford, la situation quand les véhicules roulent à une vitesse très faible ou ils s'arrêtent à cause d'un grand nombre des voitures sur la route. Selon le dictionnaire de Cambridge, ce mot signifie un route ou une ville ou il y beaucoup de trafic et le mouvement est très difficile.

1.1.1.2 Définition technique

Dans une situation normale sans congestion, les véhicules peuvent se déplacer sous la seule contrainte de la vitesse maximale autorisée. Mais quand les véhicules deviennent nombreux, la présence des autres voitures peut diminuer la vitesse d'un véhicule donné. Donc il est possible de dire que la congestion est la situation où la densité du trafic induit une augmentation des temps de trajet [10]. La congestion du trafic est un problème qui va en s'aggravant à cause de l'augmentation du nombre des voitures et de la mauvaise planification (conception du réseau routier, gestion de la circulation et la conception des villes...). Les embouteillages augmentent le temps de trajet, ce qui fait perdre du temps aux individus, ce qui en fait un problème économique important ¹. Selon l'institut des

¹<http://www.perc.org/articles/study-building-roads-cure-congestion-exercise-futility>

transports du Texas, le temps que les américains ont perdu dans les embouteillages a été multiplié par cinq en 2005 en comparaison avec le temps perdu en 1982. De plus, la consommation de carburant augmente aussi, car les voitures roulent à des vitesses non optimales. La congestion du trafic est donc également une source importante de pollution atmosphérique et d'émissions de gaz carbonique (CO₂). La congestion du trafic a donc des effets négatifs sur l'économie, l'environnement et la santé des populations.

1.1.2 La congestion du trafic en chiffres

Ici quelques chiffres sont présentés pour les milieux urbains en France et aux Etats Unis pour montrer l'importance de la congestion du trafic et prouver la nécessité de trouver des solutions pour diminuer ce phénomène.

En France :

Selon un étude de l'INRIX ² publiée en 2013, les foyers français perdent chaque année 5,9 milliards d'euros du fait des embouteillages, dont :

- 568 millions d'euros de carburant gaspillé,
- 3,5 milliards d'euros pour le temps perdu,
- et 1,8 milliard d'euros dus aux conséquences des retards.

L'automobiliste français passe en moyenne 47 heures dans les embouteillages chaque année.

Aux États Unis :

Les embouteillages constituent un gaspillage massif de temps, de carburant et d'argent. En 2011 aux États Unis les américains ont perdu de ce fait [11] :

- 5.5 milliards d'heures,
- 11 milliards de litre de carburant,
- 121 milliards de dollars à cause des retards et des pertes de carburant (sans prendre en compte les retards d'expédition, les réunions ratées...),
- 25.5 milliards de *kg* de gaz carbonique (CO₂) additionnel (équivalent à la masse de gaz carbonique produite par le décollage de 1.200 navettes spatiales avec des réservoirs pleins de carburant),

²Le Parisien, les embouteillages coûtent 5,9 milliards d'euros par an à l'économie , 2013.

- 22% (27 milliards de dollars) de coût des retards est l'effet des embouteillages sur les camions (sans prendre en compte les prix des marchandises transportées),

Pour ce qui concerne l'automobiliste américain :

- Le coût par personne a augmenté de 342 \$ en 1982 à 818 \$ en 2011,
- L'automobiliste américain a passé en moyenne 38 heures dans les embouteillages (contre 16 en 1982),
- Il a perdu 72 litres de carburant, soit la consommation hebdomadaire de l'automobiliste américain moyen (elle était de 30.2 litres en 1982),
- Pour les villes de plus de 3 millions d'habitants, les chiffres sont encore plus élevés, avec 52 heures perdues en moyenne,
- Le vendredi est le pire jour pour la congestion du trafic : les retards sont 20% supérieurs à ce qu'ils sont le lundi.

1.1.3 Les stratégies pour résoudre les problèmes de congestion du trafic

Les solutions pour réduire le problème de la congestion du trafic peuvent être divisées en plusieurs stratégies principales ^{3,4} basées sur l'infrastructure existante et utilisant de nouvelles technologies et des idées innovantes. Ces solutions peuvent augmenter la capacité routière et donner plus de possibilités de déplacement.

1.1.3.1 Agrandir et développer les réseaux routiers

La solution qui semble le plus intuitive pour résoudre les problèmes d'embouteillages est de construire de nouvelles routes et de développer les réseaux routiers pour augmenter leur capacité. Mais cette solution coûte très chère et a un effet négatif sur l'environnement. De plus, il a été montré qu'il est inutile de construire de nouvelles routes [12]. Deux professeurs de l'Université de Toronto ont montré que l'expansion des réseaux routier et autoroutier augmente le trafic. Duranton et Turner disent que les nouvelles routes causent plus de circulation pour un certain nombre de raisons : Les gens conduisent plus quand il y a plus de routes, les transports commerciaux augmentent avec l'extension du réseau et, dans une moindre mesure, les gens migrent vers les zones avec beaucoup

³<http://www.fhwa.dot.gov/congestion/toolbox/index.htm>

⁴<http://mobility.tamu.edu/mip/strategies.php>

de routes. Étant donné que la nouvelle capacité augmente simplement le trafic, ils constatent que "un nouveau kilomètre de chaussée détourne un petit peu le trafic des autres routes." Cependant, il y a des façons de gérer le trafic, en particulier aux heures de pointe, qui sont relativement peu coûteuses. [13].

1.1.3.2 Améliorer les services sur l'infrastructure existant

Environ 25% de la congestion du trafic est due aux incidents et accidents de la circulation. Donc, pour réduire la congestion il faut gérer ces événements. La gestion des accidents de la circulation est un outil important dans la réduction de l'impact de la congestion non récurrente, mais aussi pour fournir un environnement plus sûr pour les conducteurs. Il s'agit d'un processus planifié et coordonné pour détecter les incidents, y répondre, puis dégager les voies afin de rétablir la capacité de trafic en toute sécurité et aussi rapidement que possible. Ce processus coordonné implique un certain nombre de partenaires des secteurs public et privé, notamment : les forces de l'ordre, les services d'incendie et de secours, les services médicaux d'urgence, les transports, la sécurité publique des communications, la gestion des urgences, le remorquage et la récupération.

Il est aussi estimé que la mauvaise synchronisation des feux de circulation est la cause de 5 à 10% de tous les problèmes de circulation. Le recalage de feux tricolores est l'un des moyens les plus rentables pour aider à fluidifier la circulation tout en étant l'une des stratégies les plus basiques pour aider à atténuer la congestion. L'optimisation de feux de circulation peut produire des rapports coûts-avantages élevés.

Il est possible aussi d'améliorer les services sur l'infrastructure existant par la gestion de l'accès (Access Management). La gestion de l'accès (AM) est un ensemble de techniques utilisé pour contrôler l'accès aux autoroutes, artères routières principales et autres routes. La gestion de l'accès contribue à une circulation fluide et à la réduction des accidents. Les techniques de gestion de l'accès comprennent ⁵

1. L'espacement entre les feux de circulation : l'augmentation de la distance entre les feux de circulation améliore la fluidité du trafic sur les grandes artères routières, réduit la congestion et améliore la qualité de l'air.
2. Les voies sécurisées pour tourner : voies de tourne-à-gauche et de tourne-à-droite, tourne-à-gauche indirect (figure 1.1) et voie de demi-tour améliorent la fluidité du trafic. Le rond-point représente une solution pour remplacer une intersection avec de nombreux points de conflit, cause d'accidents graves.

⁵What is Access Management: http://www.ops.fhwa.dot.gov/access_mgmt/what_is_accsmgmt.htm

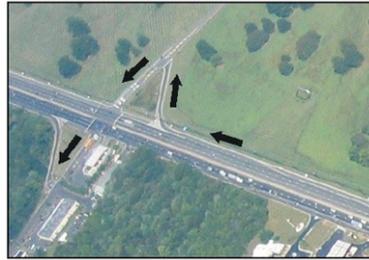


FIGURE 1.1: Le tour à gauche indirects

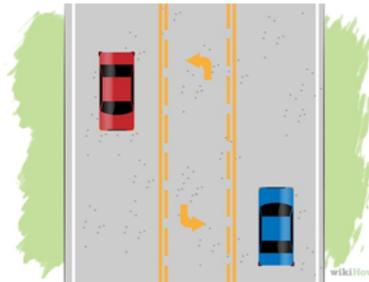


FIGURE 1.2: Le virage à gauche pour deux-voies

Le virage à gauche pour les deux-voies, le terre-plein central sont des exemples de moyens efficaces pour régler l'accès et réduire les accidents.

1.1.3.3 Modulation du prix en heures de pointe

L'idée est d'augmenter le prix des voies à péage pendant les périodes de pointe. C'est le même principe que celui utilisé dans de nombreux autres secteurs de l'économie pour répondre aux exigences d'utilisation maximale (appels téléphoniques, heures pleines/-heures creuses pour l'électricité...) Des projets sont établis pour déterminer la capacité de cette idée à réduire la congestion et accroître les options de voyage.

1.1.3.4 Ajouter plus de capacité dans des zones critiques

La capacité d'une route est la densité maximum de trafic qu'une section de cette route peut accueillir. La capacité est déterminée par un certain nombre de facteurs, comme le nombre et la largeur des voies et des accotements, et le profil de la chaussée. Lorsque certaines parties de l'autoroute sont à pleine capacité, il se crée des "goulets d'étranglement". Minimiser l'impact ou éliminer les goulets d'étranglement est un des moyens les plus efficaces pour réduire la congestion.



FIGURE 1.3: Panneaux d'informations routières

1.1.3.5 Gestion des zones de travaux

Les travaux routiers sont nécessaires pour maintenir et améliorer les réseaux routiers vieillissants. Ces travaux routiers peuvent avoir un effet très important sur le système routier aux heures de fort trafic.

Les événements non récurrents de congestion, causés par les travaux, entraînent généralement des retards imprévus, contrairement à la congestion causée par la circulation aux heures de pointe. Aux États-Unis, les zones de travaux causent plus de 480 millions d'heures de retard ⁶. Anticiper et atténuer la congestion causée par les zones de travaux routiers est un domaine qui peut avoir un impact positif sur le soulagement de la congestion. Les vraies solutions proviennent de changements fondamentaux dans la façon dont les projets sont prévus, estimés, conçus, et enfin réalisés.

1.1.3.6 Information trafic pour les conducteurs

Des informations importantes pour les conducteurs peuvent être transmises en temps réel. Ces informations peuvent aider le conducteur à éviter les bouchons et à estimer son temps de trajet. Ces informations peuvent être transmises par la radio ou peuvent être affichées par les panneaux à affichage variable (figure 1.3). Ces panneaux peuvent aussi indiquer le temps de trajet vers les destinations importantes.

Il est aussi possible d'utiliser des logiciels qui peuvent donner des informations trafic. Ces logiciels peuvent donner des informations locales, comme SYTADIN pour la région Ile de France ou des informations globales comme GoogleMap, Here, Sygic...

1.1.3.7 Réductions permanente et temporaire de la vitesse maximale

La régulation (réduction temporaire) de la vitesse autorisée améliore la sécurité et la densité du trafic. La régulation des vitesses lors des pics de circulation aide à :

⁶ Work Zone Management: http://www.fhwa.dot.gov/congestion/toolbox/work_zones.htm

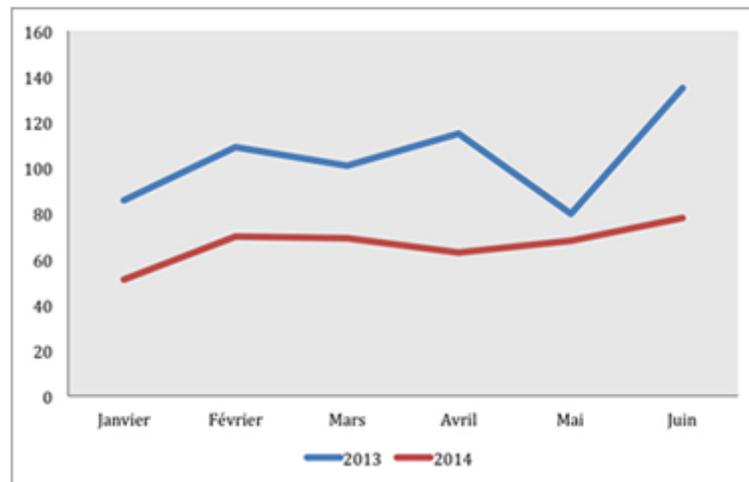


FIGURE 1.4: Nombre de minutes pendant lesquelles la vitesse de circulation sur le périphérique parisien était inférieure à 40 km/h en moyenne au cours d'une journée.

- rendre le trafic plus fluide,
- faire rouler les voitures à une vitesse quasiment stable et égale à la vitesse des autres véhicules,
- éviter le "stop and go" ⁷
- réduire l'irritation des conducteurs due à un trafic perturbé ⁸,
- anticiper les risques et éviter les arrêts brutaux. Ces risques peuvent être invisibles à cause d'un virage ou à cause des conditions météo. La réduction de la vitesse autour des zones d'accidents diminue également la probabilité d'accidents secondaires.

La réduction permanente de la limite de vitesse présente plusieurs avantages : augmentation de la sécurité, fluidification du trafic, réduction de la pollution sonore et diminution de la pollution atmosphérique. La figure 1.4 montre le nombre de minutes pendant lesquelles la vitesse de circulation sur le périphérique parisien était inférieure à 40 km/h en moyenne au cours d'une journée. La réduction de la vitesse maximale sur le périphérique de 80 km/h à 70 km/h n'a pas eu un grand effet sur la durée des trajets mais a eu un effet positif sur les embouteillages. Selon Inrix, fournisseur mondial de services d'info-traffic et d'aide à la conduite, cette réduction a diminué les bouchons de 36% et les temps dans d'embouteillage sont par ailleurs passés de 104 minutes à 66 minutes par jour. " Ces résultats peuvent s'expliquer par un trafic fluidifié, avec une vitesse plus régulière qui entraîne mécaniquement une réduction de l'effet accordéon. Conséquence : la formation

⁷Impact inattendu de la limitation de vitesse à 70 km/h sur le Périphérique

⁸Variable Speed Limit System - Tasman Highway



FIGURE 1.5: Transporter du même nombre de passagers par différents moyens de transport

de points de congestion est moins fréquente”, explique Chris Lambert, expert du trafic en Europe chez INRIX ⁹.

En plus de toutes les propositions précédentes, il y a une autre approche très efficace pour réduire les congestions. Cette approche repose sur l'idée de trouver de nouveaux modes de transport. Ces nouvelles solutions, qui profitent des nouvelles technologies, peuvent rendre les transports plus confortables, moins chers, et surtout d'utiliser moins nombre d'unités (véhicule, bus...) pour transporter le même nombre de voyageurs, ce qui peut réduire les congestions. Ce sont ces innovations que nous abordons dans la section suivante.

1.2 Nouveaux Modes de Transport

Les transports comprennent les transports en commun (train, tramway, métro, bus...) et les transports privés. Le transport privé est généralement plus flexible et plus confortable, mais il demande plus d'unités de transport pour transporter le même nombre de passagers (figure 1.5), ce qui demande plus d'espace. En conséquence, le transport privé génère plus d'embouteillages donc plus de pollution. Plusieurs idées ont été proposées pour trouver des alternatives aux modes de transport existants, des exemples de ces nouveaux modes sont le covoiturage, les VIP (Véhicules Individuels Publics) et la conduite en convoi...

Les VIP sont une solution de transport alternative au véhicule privé. Cette solution est un libre service complémentaire du transport public, avec une faible empreinte écologique.

⁹Une diminution des embouteillages de presque 40% suite à la vitesse limitée à 70 km/h

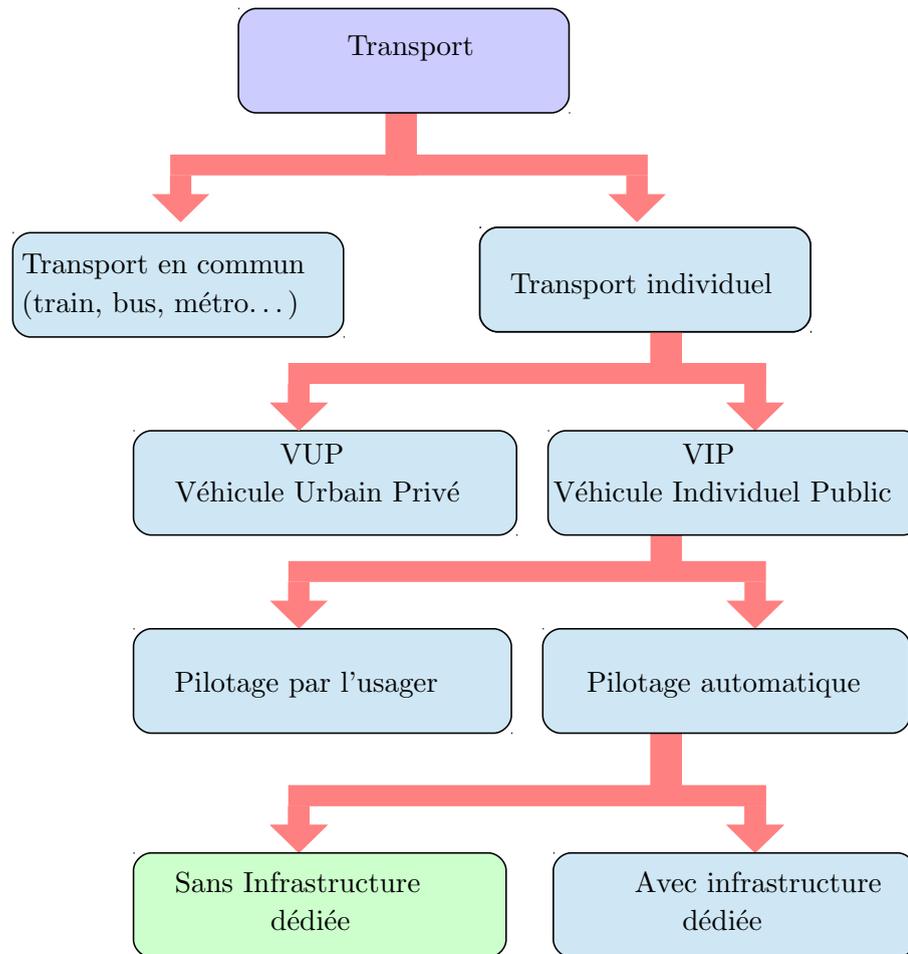


FIGURE 1.6: Modes de transport

Deux types de VIP, le VIP piloté par l'utilisateur ou automatique (figure 1.6) peut-être trouvés. Plusieurs projets de VIP pilotés par l'utilisateur sont mis en service, alors que les projets de pilotage automatique ne sont pas encore adoptés, sauf quelques projets avec des infrastructures dédiées.

1.2.1 VIP piloté par l'utilisateur

Dans ce cas, une flotte de véhicules classiques comme des vélos ou des automobiles peuvent être mis à disposition (gratuitement ou non). Cette solution ne demande pas beaucoup de changements dans l'infrastructure mais nécessite une gestion des flux. Plusieurs projets dans le monde et en France ont été mis en service.

Le projet "Liselec" à La Rochelle depuis 1999, est un exemple sur une petite échelle, constitué d'une flotte de véhicules électriques, accessibles 24 h sur 24 et 7 jours sur 7, répartis autour de 7 stations situées sur les points stratégiques de la ville. Le départ et le retour du véhicule de la station sont détectés et envoyés au poste central en temps réel

pour gérer efficacement une répartition optimale de la flotte, avec un opérateur pour déplacer les véhicules d'une station à l'autre si nécessaire.

Un autre projet est France-Auto-partage¹⁰ qui est une coopération d'entreprises créée dès 2002, qui regroupe aujourd'hui 15 opérateurs locaux d'auto-partage, existant dans 15 villes françaises, et permettent à près de 15000 adhérents de se partager l'usage de 700 voitures réparties sur 300 stations.

Le plus grand projet en France est Autolib, à Paris (figure 1.7), qui a commencé en 2011 par 250 voitures électriques en libre service et a atteint 3239 voitures, 937 stations et places et 4822 bornes de recharge mises en service en mars 2015¹¹.



FIGURE 1.7: Projet AutoLib à Paris

1.2.2 VIP entièrement automatisé

Le VIP entièrement automatisé s'intègre dans le cadre des développements pour les transports publics urbains dits "Systèmes de Transport Intelligents" (STI), qui représentent les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. Les STI concernent plusieurs domaines :

1. l'optimisation de l'utilisation des infrastructures de transport,
2. l'amélioration de la sécurité (notamment de la sécurité routière) et de la sûreté,
3. le développement des services,
4. le développement durable, car les nouveaux systèmes sont conçus pour être plus respectueux de l'environnement.

¹⁰CITIZ un projet citoyen: <http://citiz.coop/>

¹¹Donnees arretees au dimanche 29 mars 2015, Tableau de bord Autolib

Il y a plusieurs projets dans le monde qui concernent les STI, les projets les plus importants sont présentés figure 1.8. Beaucoup de ces projets se concentrent sur l'automatisation de VIP, que peut-être classés en deux niveaux selon la nécessité de préparation de l'environnement.

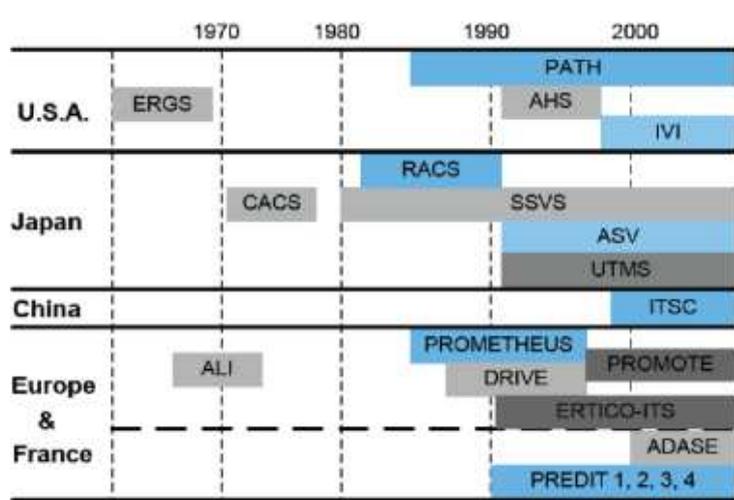


FIGURE 1.8: Projets précédents [14]

1.2.2.1 Véhicules automatisés avec infrastructure dédiée

Dans ce cas, il faut faire des changements dans l'environnement pour l'adapter aux besoins du véhicule. Ces adaptations peuvent coûter très cher, mais en même temps

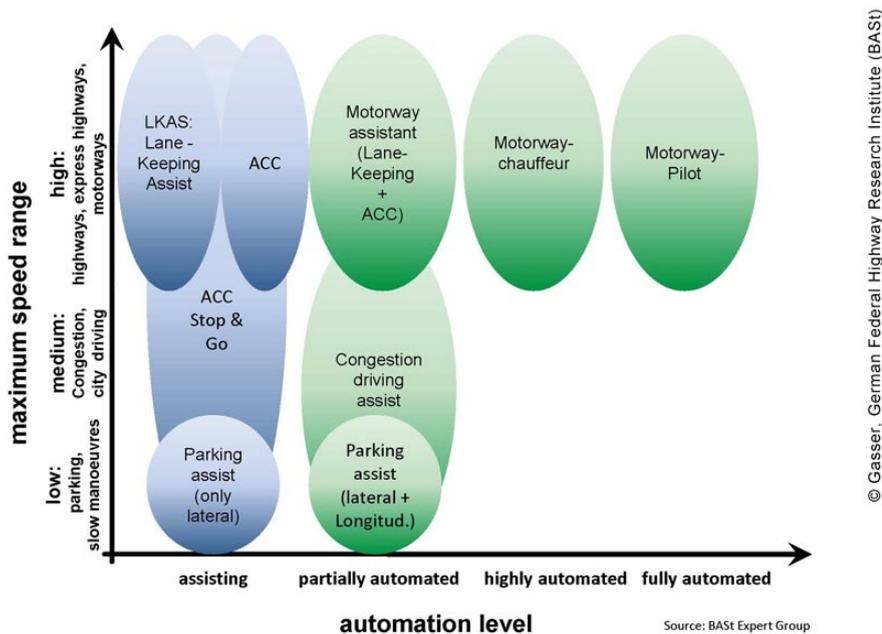


FIGURE 1.9: Représentation graphique du niveau d'automation. (NOTE : Assist = assistance) [15]

elles conduisent à des systèmes performants et sécurisés.



FIGURE 1.10: Projet1 Morgantown

La voie peut être totalement dédiée au système de transport, dans ce cas le système est nommé Personal Rapid Transit (PRT). Le premier PRT, le PRT Morgantown, a été mis en service commercial en 1975 et est resté pendant près de 35 ans le seul PRT au monde (figure 1.10). Le système ARAMIS, qui a été conçu en France dans les années 80 devait être un système de transport entièrement automatique, mais le projet n'a pas abouti à cause du trop grand nombre de contraintes du système, mais ses résultats ont été utilisés pour le VAL (Véhicule Automatique Léger), qui est un métro sur pneus totalement automatique (figure 1.11). La première version de ce projet est le métro de Lille (depuis 1983), qui fut la première ligne de métro entièrement automatique au monde.



FIGURE 1.11: Projet VAL à Lille

Un nouveau système nommé ULTra pour (Urban Light Transport) a été mis en service en 2011 à l'aéroport de Londres Heathrow. Il s'agit d'un moyen de transport automatique collectif léger permettant de se déplacer à la demande et sans arrêt intermédiaire dans de petits véhicules indépendants, en se déplaçant sur une voie dévolue à ce moyen de transport.



FIGURE 1.12: Projet ULTra (Urban Light Transport)

Un autre type de solution, moins coûteux que les solutions précédentes, est basée sur des systèmes intégrés à la route (filoguidé, balises magnétiques ou transpondeurs. . .).

Le projet AHS (Automated Highway System) dans le cadre du projet PATH (California Partners for Advanced Transit and Highways) utilise des balises magnétiques placées dans la voie pour décrire le chemin de référence.

Un autre projet nommé Phileas, aux Pays-Bas, est un bus guidé par guidage électronique. Le bus est un système hybride (GPL - électrique). Il utilise un guidage magnétique qui donne la possibilité de s'arrêter à proximité du quai, permettant une meilleure accessibilité aux personnes à mobilité réduite.

Il y a d'autres projets moins onéreux car utilisant un système optique basé sur le traitement d'images. Le bus CIVIS (figure 1.13) équipé par Irisbus à Clermont-Ferrand et Rouen, est un exemple qui utilise un système optique de guidage.



FIGURE 1.13: Projet de bus CIVIS

En général, ces projets coutent très cher et sont limités aux voies équipées, ce qui incite à trouver un système qui ne demande pas une préparation de l'environnement.

1.2.2.2 Véhicules automatisé avec infrastructure non dédiée

Dans ce cas l'environnement n'est pas spécifiquement préparé, et le véhicule se base sur sa perception de l'environnement et sur la localisation GPS. Une connaissance a priori est fréquemment utilisée mais n'est pas toujours nécessaire.

Un projet très connu est le projet "Google Car", projet de voiture autonome développé par l'entreprise Google. Le véhicule utilise une caméra, des radars, un lidar, un GPS et des capteurs personnalisé sur les roues.

Le fonctionnement des voitures automatisées a été vérifié sur routes réelles. En juin 2015 Google a annoncé ¹² que ses voitures automatisées avaient déjà parcouru plus de 1 million mille (1.6 million km) et n'avaient rencontré que 11 accidents mineurs en six ans ¹³.

L'une des limitations importants du ce système est son incapacité de travailler sous des conditions difficiles (neige, pluie forte...).



FIGURE 1.14: Google car

En 2014, Mercedes a dévoilé son camion autonome au "65th International Motor Show for commercial vehicle" et en 2015, sa voitures autonome au CES¹⁴ (figure 1.15). En plus, plusieurs autres voitures autonomes sont développées par les grands constructeurs comme (BMW, Audio...), ouvrant la porte la concurrence en terme de voiture autonome.

Des autres projets qui adressent le problème de la conduite coopérative sont réalisés ou en cours de recherche. Ils sont décrits dans [15, 16] pour les projets les plus récents et les plus importants. Les projets qui nous concernent le plus directement sont les projets de circulation en convoi, dont on parlera dans la section suivante.

¹²<https://plus.google.com/+SelfDrivingCar/posts/iMHEMH9crJb>

¹³<https://medium.com/backchannel/the-view-from-the-front-seat-of-the-google-self-driving-car-46fc9f3e6088>

¹⁴CES : Consumer Electronics Show



FIGURE 1.15: La voiture et le camion autonomes de Mercedes

1.3 Circulation en convoi

1.3.1 Spécifications de la circulation en convoi

Un convoi se compose de plusieurs véhicules qui se suivent. Le premier véhicule est le leader, qui peut être conduit manuellement ou automatiquement. Les autres véhicules se suivent, se déplaçant à la même vitesse et en gardant une distance désirée entre les véhicules successifs.

1.3.2 Avantages du convoi

Les avantages de la circulation en convoi

1. Augmentation de la capacité de trafic, en permettant aux véhicules d'utiliser moins d'espace (figure 1.16),
2. Diminution de la consommation de carburant et de la production de gaz à effet de serre par la réduction de la traînée aérodynamique,
3. Diminution de la pollution atmosphérique et du bruit acoustique,
4. Diminution de l'impact des collisions, car les voitures roulent à des vitesses proches. De plus, la réaction du système automatique est plus rapide que la réaction humaine,
5. Diminution du stress des conducteurs.

1.3.3 Les projets de circulation en convoi

Le parc Vulcania est le premier site dans le monde qui a un système de transport totalement automatisé constitué de trois véhicules de type RobuRide livrés par la société

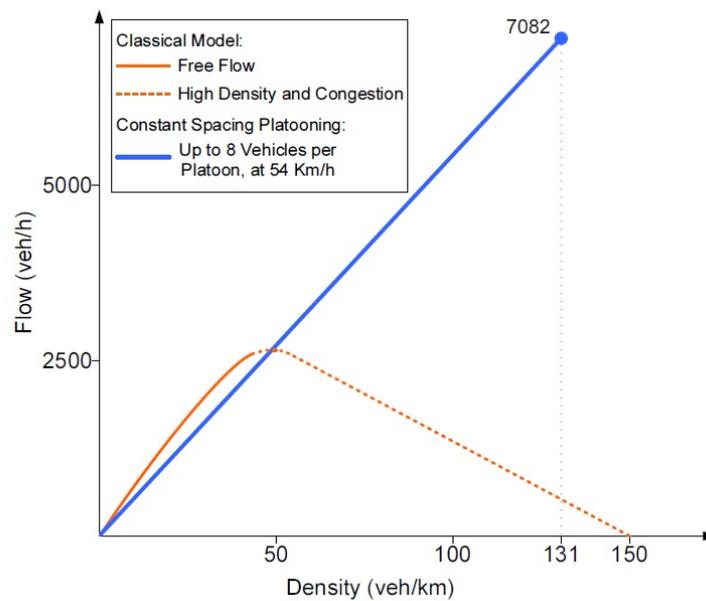


FIGURE 1.16: Comparaison de la densité de trafic lors de la circulation normale et de la circulation en convoi [17]

ROBOSOFT. Ce système peut faire un tour dans le parc sans chauffeur ni changement d'infrastructure. Sa localisation est basée sur le GPS différentiel, une centrale inertielle et l'odométrie, et un scanner laser pour la sécurité. Le programme "La Route Automatisée" a commencé en 1991 pour trouver des moyens de transport intelligent pour la ville. Le projet PRAXITELE (figure 1.17) est un projet de ce programme, mené par l'INRIA, l'INRETS et un consortium d'entreprises industrielles [18], qui a adressé des applications en libre accès aux véhicules et s'est concentré sur le problème de la circulation automatique en convoi homogène dans un milieu urbain. Il a été expérimenté dans la ville de Saint Quentin en Yvelines, où il a donné des premiers résultats satisfaisants.



FIGURE 1.17: Un convoi de deux véhicule dans le cadre du projet PRAXITELE

Un autre exemple est le projet VIPA (Véhicule Individuel Public Autonome). Le projet porte sur la mise en circulation d'un véhicule électrique de transport de passagers,

autonome en termes de conduite grâce à un système de localisation et de guidage basé sur le traitement d'images vidéo et d'algorithmes de localisation par vision en temps réel. Le VIPA peut travailler à des vitesses allant jusqu'à 20 *km/h*, dans deux modes : individuel et en flotte, et ce en présence de piétons et de véhicules. Dix VIPAs ont été mis en service fin 2010 au CHU de Clermont-Ferrand.

Le TRAVEL (Train de Véhicules Intelligents) est une plate-forme située à Polytech Lille (figure 1.18). Elle est utilisée pour l'enseignement et la recherche. Elle comprend trois véhicules de type "Robucar" électriques. Chaque véhicule est instrumenté par des capteurs de positionnement (GPS-RTK), des télémètres laser et des systèmes de vision. Cette plate-forme est complétée par un simulateur de la dynamique de véhicules terrestres CALLAS (Couplé à la Limite d'Adhésion du Sol). Il a été testé sur une piste dédiée à Polytech Lille, en utilisant trois véhicules, le leader étant guidé manuellement à une vitesse ne dépassant pas 25 *km/h*.



FIGURE 1.18: Projet TRAVEL

Le projet CRISTAL (Cellule de Recherche Industrielle en Systèmes de Transports Automatisés Légers) est un système de transport public (figure 1.19), individuel ou semi-collectif, adaptable à l'évolution de la demande de mobilité dans le temps et dans l'espace. Il a des caractéristiques importantes : non-polluant (moteur électrique), silencieux et capable d'évoluer dans deux modes : en conduite manuelle (mode libre-service) et en convoi, d'abord matériel, puis dans une deuxième étape immatériel.

Le projet PREDIT (1, 2, 3 et 4) a commencé en 1990. Dans ce projet il y a les projets Mobi-VIP (figure 1.20) et CityVIP qui concernent le déplacement sûr des VIP dans un contexte urbain. Le projet Mobi-VIP (Véhicules Individuels Publics pour la Mobilité en centre ville), dans le cadre de PREDIT 3 (2002-2006), s'intéressait aux recherches et aux expérimentations de briques technologiques visant à la mise en place de services de



FIGURE 1.19: Projet CRISTAL

mobilité en milieu urbain. Le projet "CityVIP", est une continuité de "Mobi-VIP" qui concerne le déplacement sûr de VIP dans un contexte urbain et plus particulièrement les centres urbains à accès réglementé, qui pourraient être le lieu privilégié de déploiements de tels véhicules.



FIGURE 1.20: Projet MobiVIP

Le projet SafePlatoon [19] a commencé en 2011 pour une durée de 36 mois. Il se concentre sur la problématique des convois de véhicules autonomes dans les milieux agricole, urbain et militaire (figure 1.21). SafePlatoon étudie plusieurs configurations de convois (linéaire, triangulaire, ligne de front,...) et le basculement dynamique entre ces configurations de convoi. La deuxième but du projet est de vérifier et de valider les algorithmes de décision et de commande. La vérification a été faite en prouvant la sûreté du fonctionnement des convois, la validation a été faite par la simulation et l'expérimentation sur des véhicules réels.

Du point de vue de la commande, la plupart des projets précédents utilise le modèle

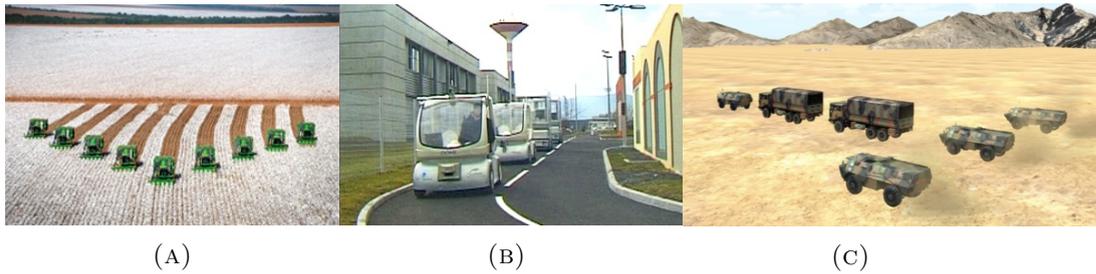


FIGURE 1.21: Projet Safeplatoon

cinématique, qui présente l'avantage d'être simple mais n'est pas valable pour commander le convoi à vitesse élevée ou dans les phases d'accélération (changer la vitesse en garantissant la distance désirée). Pour les convois en milieu urbain, la commande doit prendre en compte les comportements longitudinal et latéral, ainsi que le couplage entre eux. Pour les convois sur autoroute, les projets se concentrent sur la commande longitudinale [20–22]. Le couplage avec la commande latérale est toujours considéré négligeable du fait de la faible courbure des autoroutes. De plus, il y a moins d'obstacles qu'en milieu urbain.



FIGURE 1.22: Projet PATH

Le projet le plus important pour la commande sur autoroute est le projet de commande de convoi dans le cadre du projet PATH [20, 23, 24] (California Partners for Advanced Transit and Highways). Une expérience a été menée sur une autoroute à San Diego en août en 1997 (figure 1.22), utilisant huit voitures automatisées roulant à 105 km/h avec une distance fixe entre les véhicules (6.5 m). La commande longitudinale a été réalisée avec un modèle dynamique. Chaque véhicule était équipé d'un radar pour mesurer la distance avec le véhicule précédent. En plus, un système de communication permettait aux véhicules de recevoir la vitesse et l'accélération du véhicule précédent et du leader.



FIGURE 1.23: Project PATH (convoi de bus)

Plusieurs démonstrations ont été faites, dont des démonstrations pour un convoi de voitures (figure 1.22) et un convoi de bus. (figure 1.23) à San Diego le 1997.

Dans le projet CHAUFFEUR, des convois de deux ou trois camions ont été développés et testés. Le premier camion du convoi était conduit manuellement, mais les camions suivants étaient commandés automatiquement pour suivre le leader. Il y avait une communication entre le leader et les suivants et une barre distinctive de lampes infrarouges était montée à l'arrière des remorques de camions, qui pouvaient être reconnues par des capteurs sur les camions suivants.



FIGURE 1.24: Projet CHAUFFEUR

Après le fort développement et le test des technologies de convoi de camions entre 1996 et 2004 dans le cadre ce projet CHAUFFEUR, le projet KONVOI a commencé avec l'hypothèse que tous les problèmes technologiques étaient près d'être résolus. KONVOI était actif à partir de mi-2005 jusqu'à mi-2009. Il n'y a eu aucun projet de suivi direct.

Le concept cible pour KONVOI est un convoi de quatre camions qui conduirait dans la circulation mixte sur l'autoroute pour accroître la capacité de la voie routière en permettant aux camions d'utiliser moins d'espace et réduire la consommation de carburant et la production de gaz à effet de serre en roulant rapprochés, ce qui peut réduire la traînée aérodynamique.



FIGURE 1.25: Projet Konvoi

La mise en œuvre technique du système de KONVOI était basée sur l'intégration des composants et sous-systèmes qui étaient déjà disponibles dans le commerce ou proches de l'être. L'approche de conception de la commande est très similaire à l'approche de PATH, mais avec quelques différences dans la technologie de détection.

L'écart minimum admissible entre les camions a été fixé à 10 m. La communication était obligatoire pour la commande avec un espacement constant pour assurer la stabilité. Pour la commande latérale, chaque camion suit les marquages au sol directement plutôt que d'effectuer un "attelage électronique", c'est-à-dire suivre les mouvements latéraux du camion qui précède comme il a été fait dans le projet CHAUFFEUR.

Un autre projet important est SARTRE ¹⁵ (figure 1.26) financé par la Commission Européenne dans le cadre du 7e Programme-cadre de recherche et de développement (PCRD). Il a commencé en 2009 et s'est achevé en septembre 2012. Les véhicules roulaient à une vitesse de 90 *km/h* sur autoroute. Dans ce projet le véhicule leader (un camion) était conduit par un chauffeur expert et les autres véhicules le suivaient. Le but de ce projet était d'intégrer des véhicules automatisés dans la circulation sur une voie rapide, sans modifier l'infrastructure routière en Europe. Une expérience finale a été réalisée en septembre 2012 à une vitesse 90 *km/h* avec une distance de 4.5 *m* entre les véhicules. Bien qu'il reste des défis techniques et réglementaires avant la mise en œuvre commerciale de SARTRE, il a démontré avec succès la possibilité de conduire en convoi, dans une large mesure sur la base de technologies existantes qui peuvent être mises en œuvre sur les routes existantes sans aucun changement de l'infrastructure routière.

Le projet **Energy ITS** [25] est un autre projet de commande de convoi de camions automatisés. Ce projet japonais de cinq ans a commencé en 2008. Il vise à contribution

¹⁵SARTRE: <http://www.sartre-project.eu/>



FIGURE 1.26: Projet SARTRE

aux économies d'énergie et à la prévention du réchauffement climatique par la conduite automatisée. Un convoi de trois camions lourds et un camion léger entièrement automatisés roulant à 80 km/h avec un écartement de 4.7 m a été étudié (figure 1.27). La



FIGURE 1.27: Un convoi de 3 camions lourds et un camion léger dans le cadre de "Energy ITS"

commande latérale est basée sur la détection du marquage des couloirs au sol par vision. La commande longitudinale est basée sur la mesure d'écart par un radar et un Lidar, en plus des communications inter-véhicules. Le radar et Lidar assurent également la détection d'obstacle. Selon les résultats annoncés, la consommation de carburant peut être réduite de 15% en gardant une distance entre camions égale à 4.7 m .

Le projet de recherche **Connect&Drive** a commencé en 2009 aux Pays-Bas. Ce projet vise à concevoir et développer des véhicules nouvelle génération équipés de systèmes avancés d'aide à la conduite (ADA) pour diminuer la congestion du trafic, augmenter la capacité des routes et la sécurité. L'étude montre que des systèmes ACC conventionnels ont un impact limité sur le trafic. L'idée de ce projet est d'utiliser des informations communiquées par d'autres véhicules et des unités dans les infrastructures pour améliorer

la réponse du convoi et rendre les routes plus fluides. Une démonstration réussie ¹⁶ a été faite en 2011, montrant l'efficacité de l'idée proposée.

La compétition **GCDC** ¹⁷ est une compétition internationale [15, 26] dans la commande de convois. La première GCDC s'est tenue en mai 2011 à Helmond, Pays-Bas (figure 1.28). La compétition GCDC 2016 sera la deuxième édition de cette compétition.



FIGURE 1.28: La compétition GCDC

GCDC 2011 a été principalement concentrée sur la commande longitudinale des véhicules. Dans l'édition 2016, la commande latérale amènera la compétition à un nouveau niveau. Les défis attendant les participants incluent, par exemple, la capacité de fusionner des convois et rejoindre une route fréquentée sur une intersection en T sans intervention de conducteur.

Elle a montré l'efficacité des convois de véhicules coopératifs, en utilisant des véhicules de marques différentes, et de types différents (véhicules légers et poids lourds) automatisés par groupes différents. Plusieurs questions ont été identifiées qui devraient être adressées dans des défis futurs, l'un des plus importants étant la capacité à faire face aux données imparfaites ou manquantes d'autres véhicules.

Le projet COMPANION est un projet de recherche européen de trois ans identifiant les moyens d'appliquer en pratique la circulation de camions en convoi dans des opérations quotidiennes de transport. Le projet COMPANION a commencé en Octobre 2013 et sera terminé en 2016.

¹⁶Démonstration de Connect&Drive (<https://www.youtube.com/watch?v=OoRuE7OqFEs>)

¹⁷GCDC: <http://www.gcdc.net/>

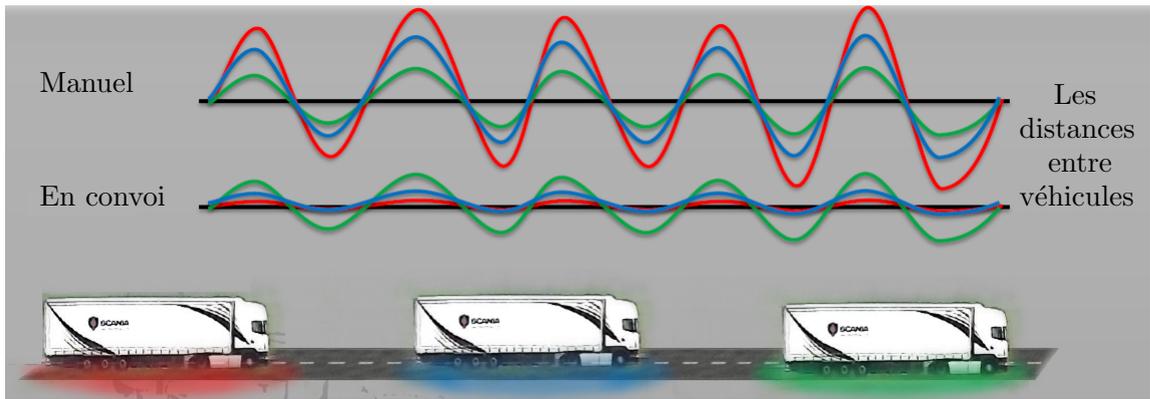


FIGURE 1.29: Le projet COMPANION

1.4 conclusion

Il y a donc eu de nombreux projets sur la commande des convois. La plupart ont concentré leur attention sur l'autoroute (PATH, CHAUFFEUR, KONVOI, SARTRE...) Les projets qui portent sur le milieu urbain, soit ont été faits pour des convois homogènes (PRAXITELE) soit ont utilisé des capteurs onéreux (comme CyberCar) et des modèles cinématiques non valides pour les vitesses élevées (MobiVIP). Dans cette thèse la commande de convoi urbain à vitesse modérée (jusqu'à 50 km/h) et la commande de convoi sur autoroute à vitesse plus élevée (140 km/h) vont être étudiées.

Chapitre 2

Modélisation

Pour commander un système, il faut trouver son modèle. Pour un système mécanique, le modèle peut être dynamique ou cinématique ou un mélange des deux. La modélisation dynamique donne les relations entre les efforts appliqués et les mouvements. Tandis que, le modèle cinématique ne dépende pas sur ces efforts. Généralement, le modèle cinématique est moins complexe que le modèle dynamique et il a moins de paramètres. Ses paramètres sont par ailleurs plus faciles à mesurer. Le modèle cinématique peut être utilisé pour des véhicules légers roulant à faible vitesse et subissant de faibles accélérations. Mais quand la masse du véhicule a un effet non négligeable sur la performance et quand le véhicule roule avec une vitesse élevée, ou encore pour éviter les collisions avec d'autres voitures ou garder des distances entre véhicules, le modèle cinématique devient insuffisant. Il faut donc considérer un modèle dynamique. Le degré de complexité de ce modèle peut varier selon la performance demandée et la dynamique du système.

Dans le cas du véhicule, il y a le mouvement longitudinal (dynamique longitudinale) et le mouvement latéral (dynamique latérale). Ces deux dynamiques doivent être bien étudiées pour commander un véhicule dans un milieu urbain.

Dans ce chapitre, un modèle pour le véhicule et puis pour le convoi seront établis. Dans la partie concernant le véhicule, les dynamiques les plus importantes seront considérées (celles qui ont des effets notables sur la performance du véhicule). Les modèles cinématique et dynamique pour le mouvement du véhicule seront établis. L'utilisation de chaque modèle, les couplages, ainsi que le découplage entre les dynamiques latérale et longitudinale seront discutés. La linéarisation et le découplage entre les deux dynamiques seront présentés pour les modèles suivants (figure 2.1) :

- le modèle cinématique classique d'Ackerman,

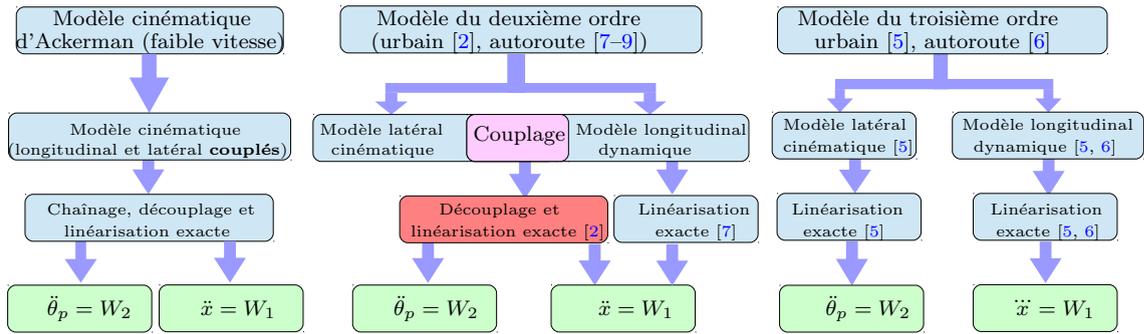


FIGURE 2.1: Les différents modèles traités (linéarisés et découplés)

- un modèle dynamique du deuxième ordre pour la dynamique longitudinale et le modèle cinématique pour le comportement latéral,
- un modèle dynamique longitudinal simplifié (non couplé avec la dynamique latérale) du deuxième ordre,
- un modèle dynamique longitudinal simplifié (non couplé avec la dynamique latérale), du troisième ordre, en prenant un modèle simplifié du moteur.

Pour le convoi, un bilan des modèles qui sont déjà proposés et leurs inconvénients sera présenté. Puis un nouveau modèle pour les dynamiques longitudinale et latérale sera établi. Le nouveau modèle longitudinal distingue la dynamique du convoi de la dynamique des véhicules, ce qui conduit à une diminution des distances inter-véhicules sans demander de communication lourde.

2.1 Notations

- $[OA, X, Y]$: Repère absolu,
- $[CG, U_L, W_L]$: Repère du véhicule,
- CG : Centre de gravité du véhicule coordonnées $[x, y]$,
- C : Trajectoire de référence, définie dans le repère absolu,
- O_{av}, O : Centres des roues avant et arrière du véhicule respectivement,
- M Point de la trajectoire C le plus proche de O ,
- S : Abscisse curviligne du point M ,
- $c(S)$: Courbure de la trajectoire au point M ,

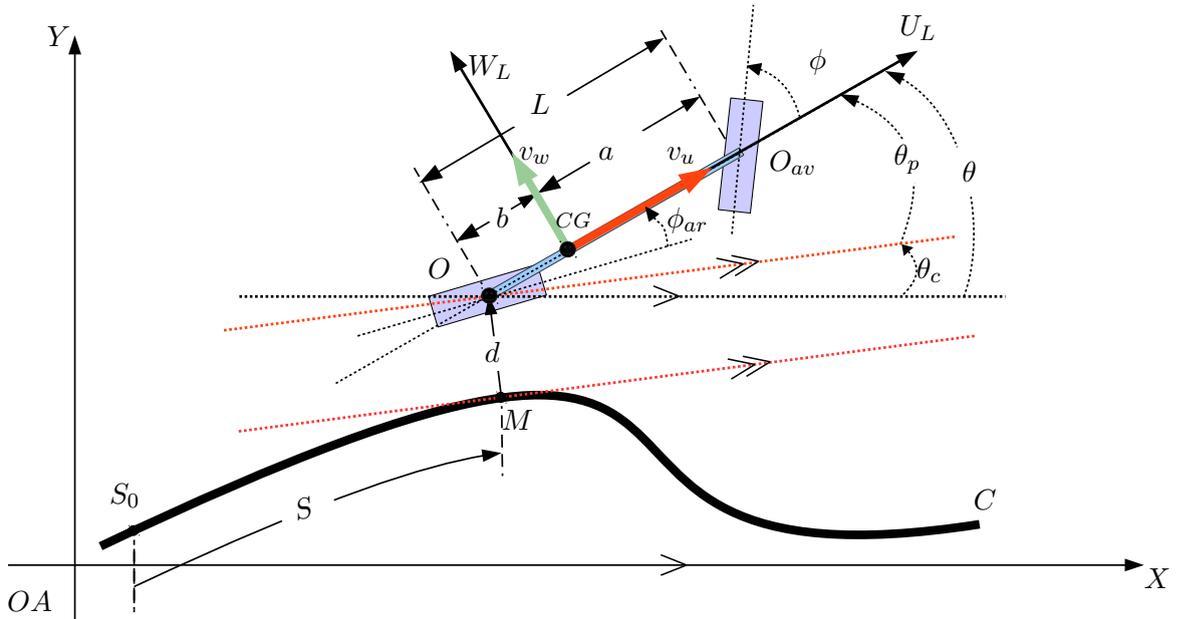


FIGURE 2.2: Le modèle bicyclette

- $\theta_c(S)$: Orientation de la tangente à la trajectoire, au même point, par rapport au repère absolu,
- θ : Orientation du véhicule par rapport au repère $[OA, X, Y]$,
- $\theta_p = \theta - \theta_c(S)$: Déviation angulaire du véhicule par rapport à la trajectoire C ,
- d : Déviation latérale du véhicule par rapport à C ,
- ϕ : Angle de braquage, qui est l'angle entre la roue avant et l'axe du véhicule,
- ϕ_{ar} : Angle entre la roue arrière et l'axe du véhicule,
- v_u : Vitesse du véhicule au point CG sur l'axe U_L (la vitesse longitudinale du véhicule),
- v_w : Vitesse du véhicule au point CG sur l'axe W_L ,
- F_{moteur} : Force générée par le moteur,
- F_g : Force gravitationnelle,
- F_{Aero} : Forces aérodynamiques,
- F_{drag} : Forces de résistance au roulement,
- F_f, F_r : Forces latérales sur les pneus avant et arrière respectivement,
- $F_{res} = F_{drag} + F_{aero} + F_g$: Somme des forces de résistance, de traînage aérodynamiques et de gravité,

- m : Masse du véhicule,
- d_m : Module des forces de résistance au roulement,
- g : Accélération de la pesanteur,
- ξ : Pente de la route,
- ρ : Masse volumique de l'air,
- A : Section transversale du véhicule,
- C_d : Coefficient de traînée du véhicule,
- J : Moment d'inertie du véhicule autour du centre de gravité,
- L : Empattement du véhicule,
- b : Distance entre le centre de la roue arrière et CG ,
- a : Distance entre le centre de la roue avant et CG ,
- τ : Temps de réponse du moteur,
- τ_s : Constante de temps de direction,
- u_1 (ou u) : Entrée de commande du moteur,
- W_1 (ou W) : Entrée de commande de la partie longitudinale après la linéarisation,
- u_2 : Entrée de la commande du système de direction,
- W_2 : Entrée de commande de la partie latérale après la linéarisation,
- c_2 : Coefficient d'amplification du système de direction,

Pour un véhicule dans un convoi l'indice i est utilisé pour définir les paramètres du i -ème véhicule.

2.2 Modélisation du véhicule

Les dynamiques les plus importantes d'un véhicule routier sont :

- l'aérodynamique,
- la dynamique du groupe motopulseur et du système de freinage,

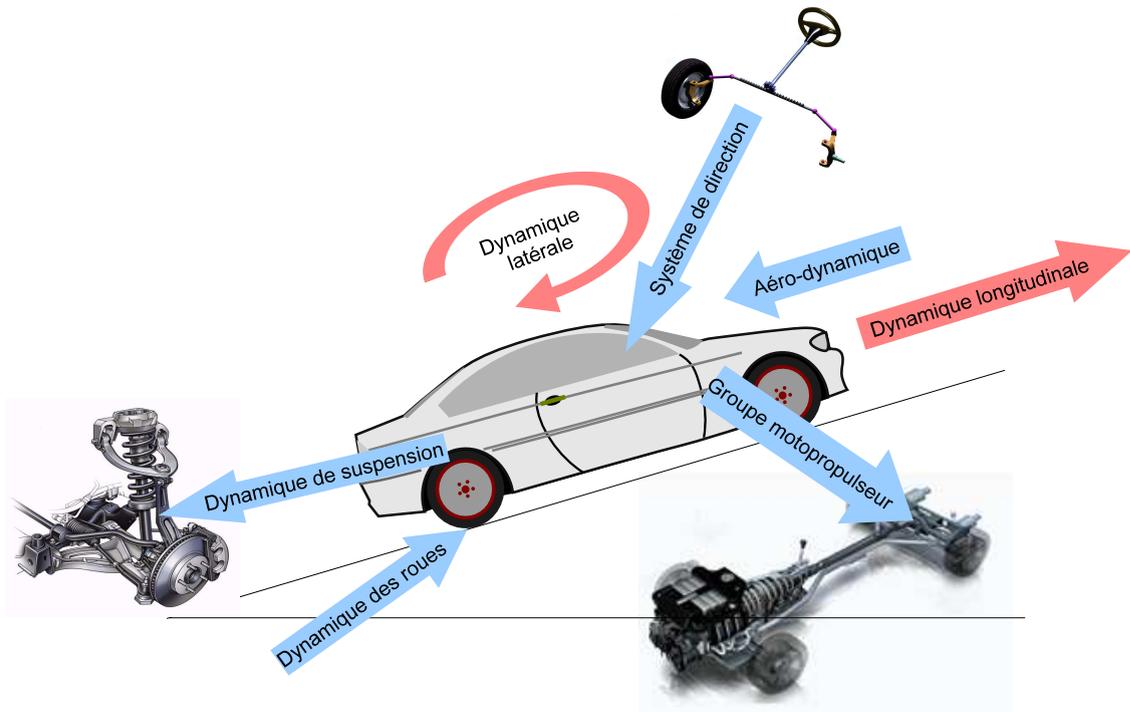


FIGURE 2.3: Les dynamiques du véhicule

- la dynamique des roues et le contact roues/sol,
- la dynamique du système de direction,
- la dynamique du système de suspension,
- la dynamique du centre de masse.

Les effets de ces dynamiques doivent être pris en compte selon la vitesse, l'accélération maximale, la forme du véhicule, le poids, le terrain sur lequel le véhicule roule, la précision demandée de la commande et le but de la commande. Par exemple, l'effet aérodynamique et les glissements pour une véhicule roulant à faible vitesse peut être ignoré, mais pas l'effet de traction qui aura un effet plus important (voir figure 2.4). La dynamique du centre de masse est importante pour éviter le renversement des véhicules lourds et hauts, même à faible vitesse [27].

La complexité du modèle du véhicule dépend des dynamiques qui sont prises en compte.

Dans notre étude, les dynamiques de la suspension et du centre de masse ne sont pas prises en compte car un convoi roulant sur une route plane asphaltée est considéré.

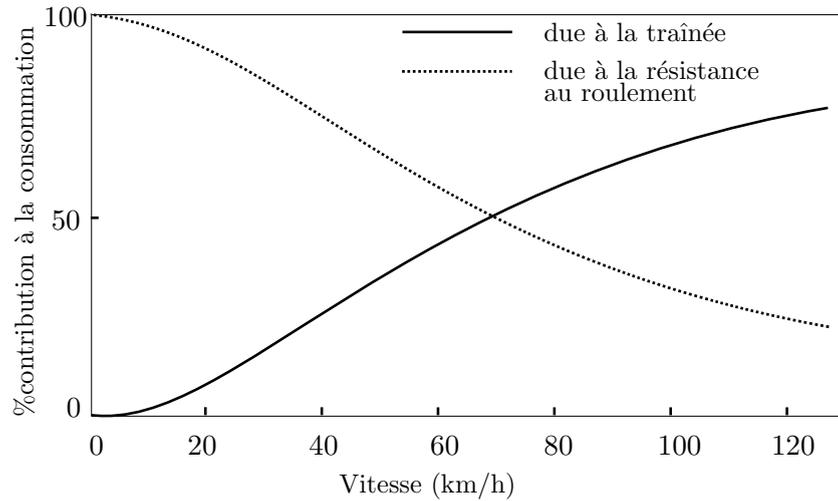


FIGURE 2.4: Contributions relatives des forces aérodynamiques et de résistance au roulement dans la consommation [28]

2.2.1 Aérodynamique

L'aérodynamique concerne les forces s'opposant au mouvement relatif d'un objet mobile par rapport à un fluide environnant. Contrairement à d'autres forces de résistance, comme la friction à sec, qui sont à peu près indépendantes de la vitesse, les forces de traînée dépendent de la vitesse. La force de traction est proportionnelle à la vitesse d'un écoulement laminaire et à une vitesse au carré pour un écoulement turbulent.

Les forces aérodynamiques montrées sur la figure (2.5) sont décomposées en :

- force de traînée : générée par la résistance de la surface du véhicule et des ailerons.
- force de portance : c'est la force perpendiculaire au mouvement du véhicule. Cette force est générée par la différence de pression de l'air au-dessus et au dessous de la surface. Dans le cas du véhicule, les forces de portance sont dues à la forme du véhicule et du sol, du diffuseur et des ailerons.

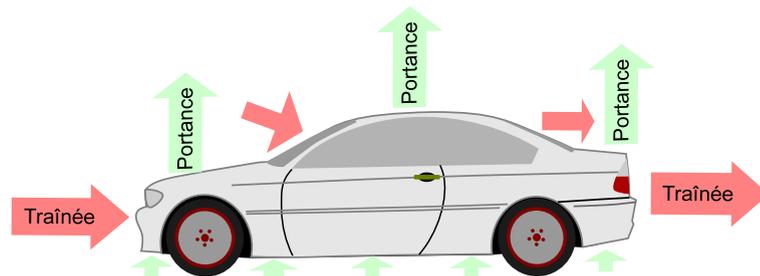


FIGURE 2.5: Aérodynamique du véhicule

La force la plus importante est la force de traînée due à la forme de la surface frontale du véhicule, qui est donnée par [29] :

$$F_{Aero} = -sign(v) \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (2.1)$$

2.2.2 Modèle du groupe motopropulseur

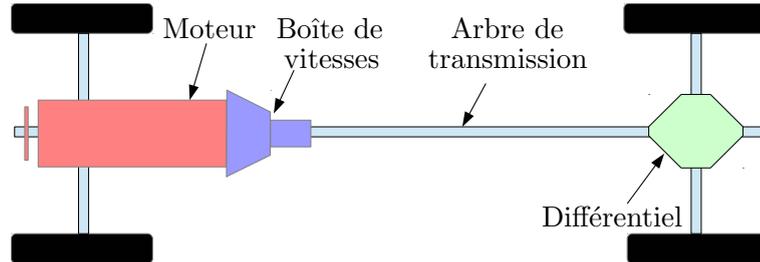


FIGURE 2.6: Groupe motopropulseur

Le groupe motopropulseur pour un véhicule à moteur thermique est constitué :

- du moteur avec ses accessoires (alimentation en carburant, échappement, refroidissement, allumage, etc...),
- de la transmission : boîte de vitesses et embrayage, ou boîte automatique : c'est le système mécanique qui adapte la transformation du couple moteur à un arbre récepteur (pour augmenter le couple moteur en réduisant la vitesse de rotation).
- du différentiel : c'est un système mécanique qui distribue la vitesse de rotation par répartition de l'effort, de façon immédiate et automatique, aux besoins d'un ensemble mécanique. Le différentiel d'un véhicule permet au roues motrices d'avoir des vitesses différentes lors du passage d'une courbe).

Plusieurs modèles ont été proposés pour le moteur [30, 31]. Ces modèles sont complexes et nécessitent de connaître de nombreux paramètres, ce qui peut compliquer la commande et nécessiter des capteurs onéreux. Une autre solution souvent utilisée pour le modèle paramétrique du moteur est celle dans laquelle des cartes de moteur, obtenues à partir de données expérimentales, sont utilisées pour remplacer plusieurs fonctions paramétriques.

Le différentiel transfère le couple moteur vers les roues. Il existe des modèles complexes pour ces systèmes, qui sont non linéaires et peuvent compliquer la loi de commande. Cependant, il est possible, en première approximation, de considérer ces systèmes comme une transformation idéale de couple, ce qui simplifie le modèle du groupe motopropulseur.

Tous les modèles décrits ci-dessus sont complexes et fortement non linéaires, ce qui rend difficile la conception d'une loi de commande longitudinale. Un modèle longitudinal

simplifié du véhicule, qui représente bien la dynamique du système original, peut être obtenu pour simplifier la tâche de conception du contrôleur. Cela peut être fait en prenant un modèle simplifié du groupe motopropulseur, dans lequel les dynamiques rapides sont négligées et sont remplacées par une réponse d'état quasi-stationnaire [14, 31, 32].

Un modèle simple pour le moteur peut être trouvé dans [31]. Ce modèle ignore la dynamique rapide du moteur, ce qui donne un modèle du premier ordre (figure 2.7). Ce modèle est valide pour des applications avec une loi de commande qui a une faible bande passante. En supposant que les systèmes de transmission et le différentiel sont des systèmes de transmission de couple avec une perte, ils peuvent être modélisés comme un système avec un gain.

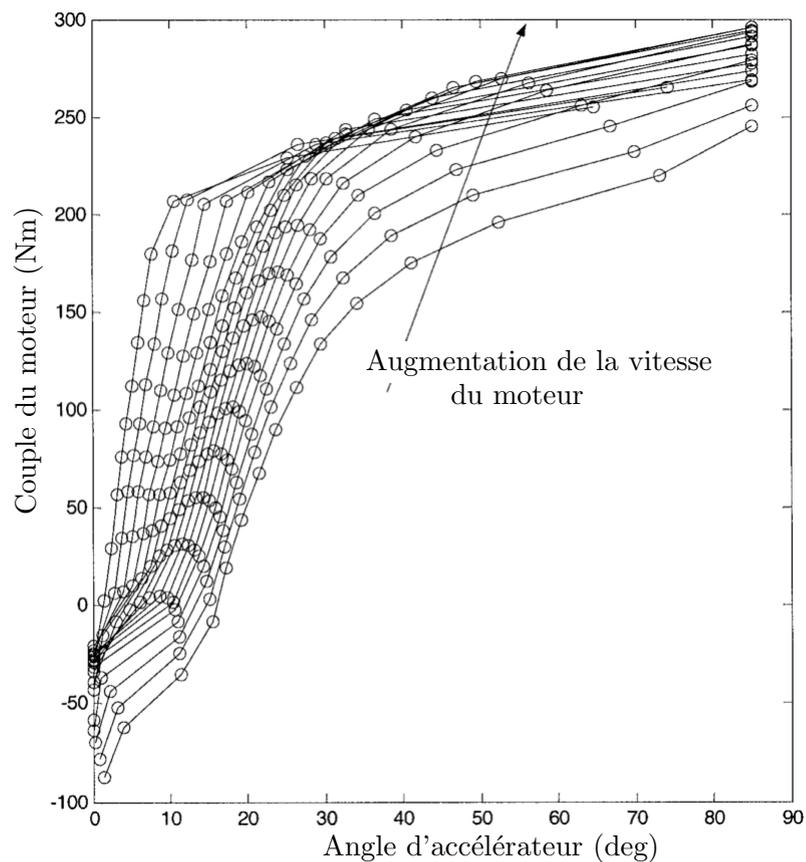


FIGURE 2.7: Réponse du moteur [31]

Le modèle du groupe motopropulseur peut donc se réduire à un système du premier ordre :

$$\tau \dot{F}_{moteur} = F_{moteur} + u \quad (2.2)$$

où u représente l'entrée de commande du moteur.

2.2.3 Modèle du système de freinage

Un frein est un dispositif mécanique qui sert à ralentir ou arrêter un objet en mouvement. En général, il utilise la friction entre deux surfaces pour convertir l'énergie cinétique en énergie thermique. Le système de freinage est constitué principalement (figure 2.8) :

- d'une pédale de frein,
- d'un maître-cylindre,
- de flexibles,
- de freins à disque (plaquette, disque ventilé) ou freins à tambour...

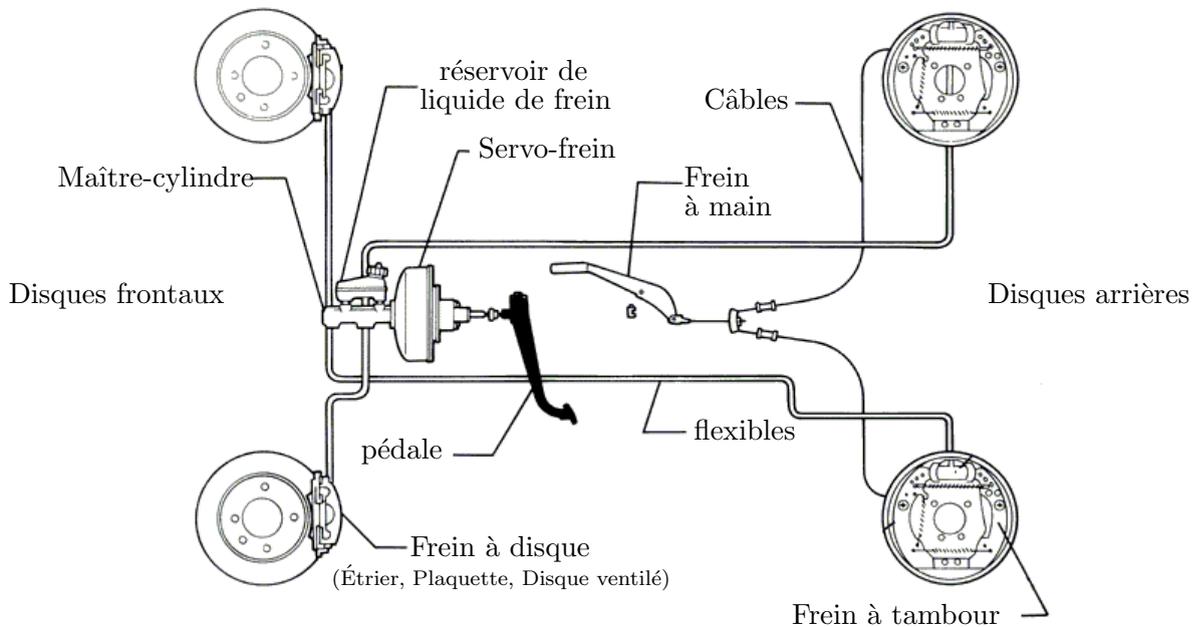


FIGURE 2.8: Système de freinage

Selon [33, 34], la force de freinage (le moment de freinage T_f) peut être considéré comme proportionnelle à la pression dans la chambre de freinage. La fonction de transfert de la pression au niveau de la pédale de frein P_d à la pression dans la chambre de freinage peut être approchée par un système du premier ordre avec un retard [33], ce qui nous donne un système de freinage du premier ordre :

$$T_f(s) = \frac{K_f}{1 + \tau_f s} e^{-s T_{d_f}} P_d(s) \quad (2.3)$$

où :

- $T_f(s)$ est la fonction de Laplace du moment de freinage,
- K_f est une constante définie par le coefficient de friction entre la plaquette et le disque de frein, la surface effective de friction et la surface effective de pression. Donc K_f est défini selon la fabrication du système de freinage,
- Td_f est le retard dans le système de freinage,
- τ_f est le temps de réponse du système de freinage.
- $P_d(s)$ est la fonction de Laplace de la pression au niveau de la pédale de frein,

2.2.4 Modèle de contact roues/sol et glissement

L'étude de l'interaction entre le sol et les roues est un problème très important pour bien décrire le comportement du véhicule. Les couples produits par le moteur sont transmis par l'interaction roues/sol sous la forme de forces qui provoquent le mouvement du châssis. Il est donc très important de trouver un modèle de cette interaction pour bien définir le modèle du véhicule.

Pour définir les forces sur les pneus, il faut définir le glissement longitudinal et l'angle de dérive de la roue. Le glissement longitudinal est la différence entre la vitesse réelle de la roue v_r et la vitesse théorique correspondant au roulement sans glissement $\omega_r r_r$. Le coefficient de glissement d'une roue peut être défini comme suit :

$$s_r = \frac{v_r - \omega_r r_r}{v_r} \quad (2.4)$$

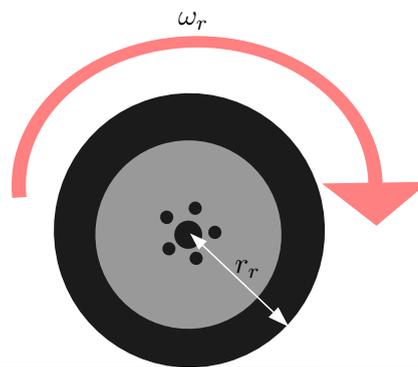


FIGURE 2.9: Une roue de véhicule

où r_r est le rayon de roue avec le pneu (en supposant que tous les roues sont identiques), ω_r la vitesse angulaire de la roue, v_r la vitesse réelle du centre de la roue.

L'angle de dérive de la roue est défini comme l'angle entre la direction de la roue et la direction du vecteur vitesse réel. Cette dérive est causée par les forces latérales sur la roue, qui déforment le pneu (voir figure 2.10). L'angle de dérive β_r est donné par l'équation (2.5) :

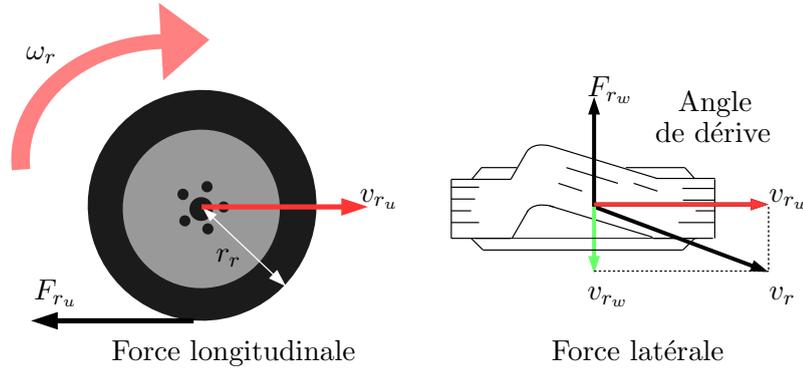


FIGURE 2.10: Les forces sur la roue et sa déformation

$$\beta_r = \arctan\left(\frac{v_{r_w}}{|v_{r_u}|}\right) \tag{2.5}$$

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature pour l'interaction roue/sol. Tous les modèles utilisent les mêmes variables pour obtenir l'effort de contact. Ces variables sont liées à l'élasticité du pneu, qui n'est pas rigide. Le modèle le plus connu et le plus utilisé est le modèle de Pacejka [35], connu sous le nom de "Magic formula". Ce modèle est un modèle empirique qui donne les forces latérales et longitudinales sur les roues (figure 2.11).

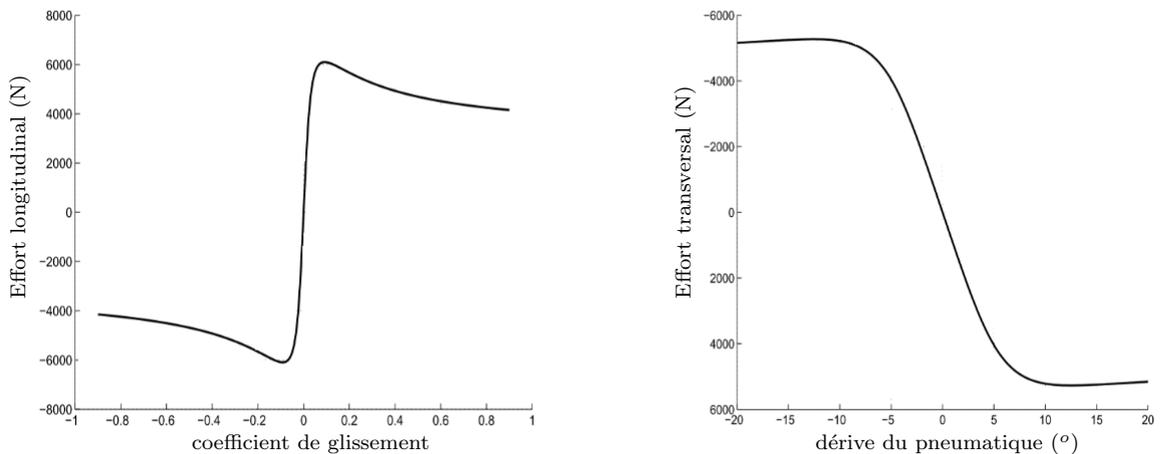


FIGURE 2.11: Courbes des forces de contact en fonction du glissement et de l'angle de dérive [3]

Un autre modèle important qui donne la relation entre la force longitudinale et la force latérale est le modèle donné dans [36, 37]. Ce modèle constate que la force de traction sur la roue est *limitée*, donc il y a une relation entre la force longitudinale et la force latérale, et que les valeurs maximales de ces forces forment une ellipse comme dans la figure 2.12. Ceci explique le couplage entre la dynamique latérale et la dynamique longitudinale, comme il sera montré dans la prochaine section.

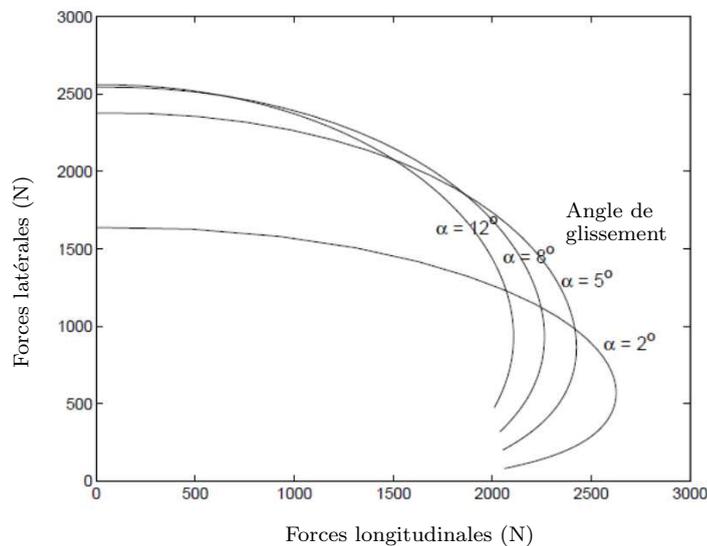


FIGURE 2.12: Courbe représentative de la somme des forces de contact roues/sol "ellipse de friction" [36, 37]

2.2.5 Modèle du système de direction

Le système de direction classique est représenté figure 2.13. Ce système comprend :

- le volant,
- la colonne de direction,
- le boîtier de direction qui transforme le mouvement de rotation du volant en mouvement de translation,
- la crémaillère,
- les biellettes, ces biellettes sont la liaison entre la partie suspendue et la partie non suspendue du train directeur,
- les porte-fusées des roues directrices, avec un axe de direction proche de la verticale.
- l'unité d'assistance qui, grâce à une source de puissance annexe, réduit les efforts demandés au conducteur pour orienter les roues.

L'unité d'assistance et les rotules de direction relient l'unité de direction assistée hydraulique à l'ensemble roues avant. L'ensemble roues avant comprend les roues directrices avant et toutes les autres pièces qui tournent autour du pivot central de chaque côté. Il y a principalement deux types de systèmes de direction assistée de puissance hydraulique : système à recirculation à bille, et système à crémaillère et pignon. Le système à crémaillère et pignon est plus précis que le système de recirculation de billes, mais il fournit un gain de direction inférieur, et donc il demande un effort plus élevé au conducteur. C'est le type le plus largement utilisé pour les voitures particulières. D'autre part, le système du type à recirculation de billes présente un avantage en ce qu'il peut fournir un gain de direction dans un petit espace avec de faibles niveaux de friction. Ses applications sont généralement limitées aux camions.

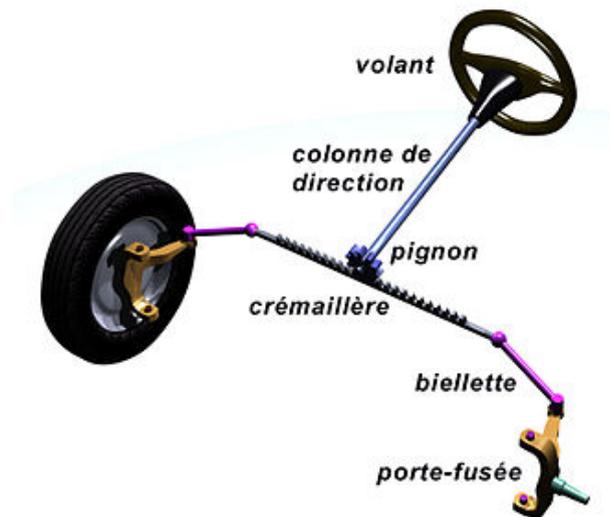


FIGURE 2.13: Système de direction [Wikipedia]

Un système de direction plus récent, dit "steering by wire", remplace la liaison mécanique entre la direction et les roues par un système électrique. Ce système comprend un moteur directeur et un capteur d'angle de direction. Le système de direction classique peut être transformé en un système "steering by wire" en coupant l'arbre de direction et en ajoutant le moteur avec un capteur sur la partie connectée aux roues. En plus, il y a un capteur qui peut être mis sur la colonne de direction comme dans la figure 2.14. Le système peut rester manuel, en utilisant le signal du capteur connecté à la colonne de direction, ou automatisé en utilisant une commande pour contrôler le moteur.

Des modèles mathématiques complexes pour le système de direction peuvent être trouvés dans [38, 39]. Dans la thèse, un modèle simple de ce système est utilisé en supposant que la dynamique de direction peut être considérée comme un retard sur l'angle désiré, donc le modèle du système de direction peut être considéré comme un système du premier ordre [40, 41] :

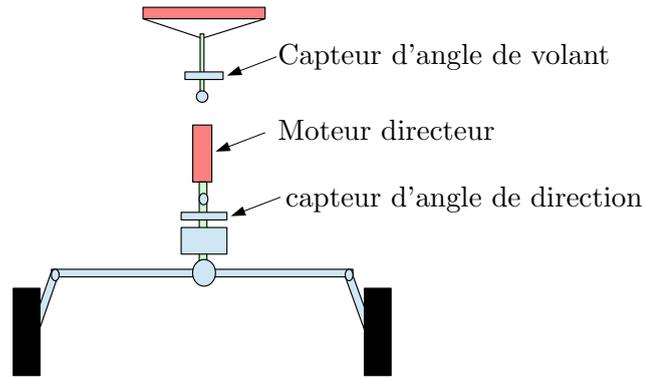


FIGURE 2.14: Système de "direction by wire"

$$\dot{\phi} = -\frac{1}{\tau_s} \phi + c_2 \cdot u_2 \quad (2.6)$$

2.2.6 Modélisation du mouvement du véhicule

Différents modèles pour le véhicule sont présentés. Le modèle cinématique est simple mais ne peut pas être utilisé pour des vitesses élevées. Le modèle dynamique, quant à lui, représente mieux le système mais il est plus complexe, ce qui a encouragé les chercheurs à définir un modèle cinématique étendu [42] qui prend en compte les glissements. Le modèle cinématique étendu reste simple et peut être utilisé pour la commande latérale et longitudinale.

2.2.6.1 Modèle cinématique

Le modèle de bicyclette [31, 43], représenté figure 2.15 est utilisé. Dans ce modèle, les roues avant gauche et droite sont représentées par une seule roue au point A. De la même façon, les roues arrières sont représentées par une roue arrière centrale au point B. Le modèle est obtenu en supposant que les quatre roues avant et arrière peuvent être orientées. Ce modèle peut être écrit dans le repère absolu [31, 43] ou dans le repère de la trajectoire [43] comme suit :

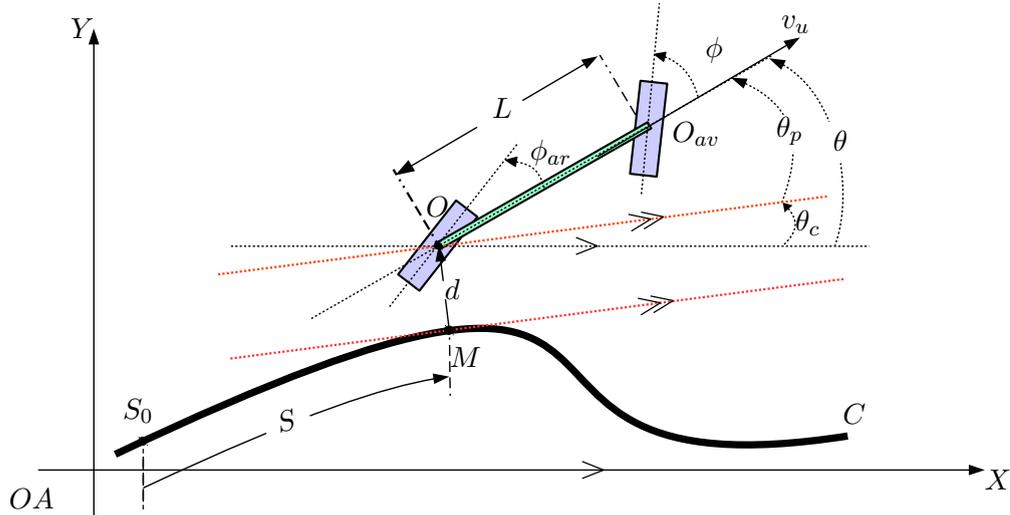


FIGURE 2.15: Le modèle bicyclette

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S} = \frac{\cos(\theta_p + \phi_{ar})}{1 - d c(S)} v_u \\ \dot{d} = \sin(\theta_p + \phi_{ar}) v_u \\ \dot{\theta}_p = \left[\cos(\phi_{ar}) \frac{\tan(\phi) - \tan(\phi_{ar})}{L} - \frac{c(S) \cos(\theta_p + \phi_{ar})}{1 - d c(S)} \right] v_u \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Ce modèle a une singularité quand $d = \frac{1}{c(S)}$ (le véhicule est au centre du cercle de la trajectoire de référence en M). Dans la pratique, il est facile d'éviter cette singularité si le véhicule a été bien initialisé.

Ce modèle a été développé en considérant que les deux roues du véhicule roulent sans glisser sur le sol, donc les vecteurs vitesse aux points O_{av} et O sont dans la direction de l'orientation des roues avant et arrière respectivement. En d'autres termes, le vecteur vitesse de la roue avant fait un angle ϕ avec l'axe longitudinal du véhicule. De même, le vecteur vitesse de la roue arrière fait un angle ϕ_{ar} avec l'axe longitudinal du véhicule. C'est une hypothèse raisonnable pour une faible vitesse de déplacement du véhicule (par exemple pour des vitesses inférieures à 5 m/s). Donc ce modèle est généralement utilisé pour des véhicules légers se déplaçant à faible vitesse, car les véhicules lourds induisent une déformation de la roue en tournant, qui à son tour produit un glissement latéral. Un sol peu adhérent peut toujours engendrer des glissements latéraux et longitudinaux.

Si seules les roues avant sont directrices, l'angle de braquage arrière ϕ_{ar} est mis à zéro, le modèle suivant peut être obtenu :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S} = \frac{\cos\theta_p}{1 - d c(S)} v_u \\ \dot{d} = \sin\theta_p v_u \\ \dot{\theta}_p = \left(\frac{\tan\phi}{L} - \frac{c(S) \cos\theta_p}{1 - d c(S)} \right) v_u \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Ce modèle peut être utilisé pour la commande latérale ou il peut aussi être utilisé pour les deux commandes (latérale et longitudinale).

Par dérivation de $\dot{\theta}_p$, il vient :

$$\ddot{\theta}_p = \alpha_5 \dot{\phi} + \alpha_6 v_u + \alpha_7 \quad (2.9)$$

où :

$$\alpha_5 = \frac{v_u}{L \cos^2\theta_p} \quad , \quad \alpha_6 = \frac{\tan\phi}{L} - \frac{c(S) \cos\theta_p}{1 - d c(S)},$$

$$\alpha_7 = -\left(\frac{\dot{c}(S) \cos\theta_p}{1 - d c(S)} - \frac{c(S) \sin\theta_p \dot{\theta}_p}{1 - d c(S)} + \frac{c(S) \cos\theta_p}{(1 - d c(S))^2} (d \dot{c}(S) + d \dot{c}(S)) \right) v_u$$

avec la condition $\theta_p \neq \frac{\pi}{2} + \pi k$, $k = 1, 2, \dots$

Pendant les déplacements sur route sèche, l'hypothèse de non-glissement est raisonnable si les accélérations et les freinages sont modérés (le glissement réel est alors généralement inférieur à 4 %). Cela n'est plus le cas lors d'un freinage brusque ou lorsque la route est mouillée ou verglacée. C'est donc une limitation importante de la validité du modèle [44].

2.2.6.2 Modèle dynamique

Des modèles dynamiques peuvent être trouvés dans la littérature. En général, tous ces modèles prennent en compte les glissements. Ils peuvent être utilisés pour la commande longitudinale ou la commande latérale [45–47] ou les deux [22, 40, 44] afin d'obtenir

une meilleure performance qu'avec le modèle cinématique. Ils peuvent aussi être utilisés pour l'observation des angles de glissement [48, 49]. Pour simplifier ces modèles, des approximations pourraient être faites en supposant que les angles de direction et de glissement sont petits.

Dans [50], il y a un modèle non-linéaire plus complexe que le modèle cinématique. Ce modèle est obtenu à l'aide d'équations cinématiques et des équations dynamiques. Cependant, des hypothèses simplificatrices ont été effectuées :

- les angles de glissement sont très petits.
- la vitesse longitudinale est constante.
- le modèle d'incertitude du paramètre de rigidité de glissement est connu.

Ces hypothèses limitent la validité du modèle obtenu. La vérification est faite par simulation pour un robot mobile (32 kg) roulant à une vitesse de 10 m/s sur un seul chemin avec une vitesse constante.

Un modèle mixant un modèle dynamique longitudinal avec un modèle cinématique latéral (modèle bicyclette) a été proposé dans [51]. Dans ce travail, un modèle simplifié du système de direction est pris en compte. Le comportement latéral a été linéarisé et un système linéaire chaîné est obtenu. Ce modèle peut être utilisé pour la commande longitudinale et latérale, mais il ne prend pas en compte les glissements. Donc il ne peut pas être utilisé pour des vitesses élevées.

Le modèle dynamique qui a été utilisé dans [46] est un modèle simple linéaire valable pour de petits angles de direction. Ce modèle a été utilisé pour la commande latérale pour des vitesses allant jusqu'à 30 km/h. Il pourrait être utilisé pour des vitesses plus élevées (jusqu'à 50 km/h) mais il faudrait estimer un paramètre (rigidité de glissement) en temps réel.

Le modèle utilisé dans [22] prend en compte les glissements, la traînée et la portance. Il peut être utilisé pour les commandes longitudinale et latérale avec de petits angles de direction et de glissement. Mais ce modèle est établi pour un véhicule avec un moteur à l'avant, et il faut faire quelques modifications pour un véhicule avec moteur à l'arrière. En plus, il ne peut pas être utilisé pour des vitesses très faibles (cas singulier du modèle).

Les modèles dynamiques sont plus complexes que les modèles cinématiques. Des approximations autour de petits angles sont toujours faites pour réduire la complexité de ces modèles, ce qui réduit leur gamme d'utilisation. De plus, il y a plusieurs paramètres qui sont difficiles à estimer (et qui peuvent changer avec le temps). La commande basée sur le

modèle dynamique est donc plus complexe. Ces difficultés d'utilisation du modèle dynamique et la simplicité du modèle cinématique ont poussé à étendre le modèle cinématique plutôt que d'utiliser le modèle dynamique.

2.2.6.3 Modèle cinématique étendu

Le modèle cinématique donné dans (2.7) et (2.8) ne prend pas en compte les glissements. Ce modèle ne peut représenter les véhicules que pour de faibles vitesses. Mais la simplicité de ce modèle et la possibilité de le linéariser facilement a attiré les chercheurs pour l'étendre pour prendre en compte les glissements. C'est ce qui a été fait dans [3, 4].

Il est possible de considérer que les deux angles de glissement β_{av}, β_{ar} sont des angles de direction additionnelles pour les roues avant et arrière, dans un modèle cinématique satisfaisant les conditions de roulement sans glissement. L'angle de braquage avant devient égal à la somme de l'angle de direction avant ϕ et de l'angle avant de glissement latéral β_{av} . De même, l'angle de braquage arrière devient égal à l'angle arrière de glissement latéral β_{ar} . En utilisant le modèle de véhicule avec deux roues directrices (2.7) il vient [3] :

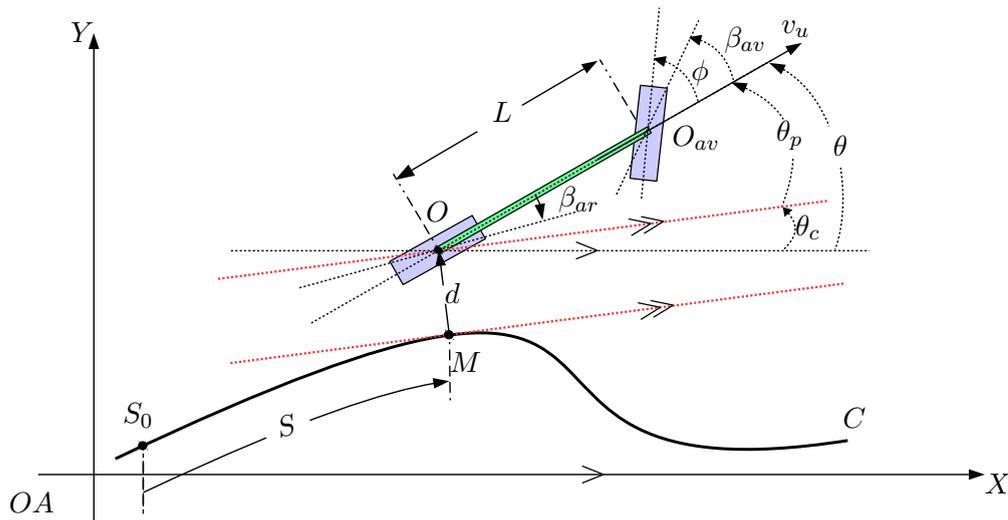


FIGURE 2.16: Le modèle bicyclette avec les angles de glissement

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S} = \frac{\cos(\theta_p + \beta_{ar})}{1 - d c(S)} v_u \\ \dot{d} = \sin(\theta_p + \beta_{ar}) v_u \\ \dot{\theta}_p = \left[\cos \beta_{ar} \frac{\tan(\phi + \beta_{av}) - \tan(\beta_{ar})}{L} - \frac{c(S) \cos(\theta_p + \beta_{ar})}{1 - d c(S)} \right] v_u \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Ce modèle a été bien étudié et validé dans [3]. Il permet de prendre en compte les glissements sans recourir à un modèle dynamique complexe. Des résultats prometteurs ont été obtenus sur un véhicule tout-terrain dans [3, 52–54] en utilisant ce modèle. Les performances ont été améliorées en utilisant un modèle prédictif [53] pour anticiper la courbure de la voie en avant du véhicule, ainsi qu’une commande adaptative et un observateur [4, 47, 55–57] pour estimer les angles de glissement. Ce modèle a été utilisé aussi pour modéliser les véhicules dans un convoi tout-terrain [58].

2.2.6.4 Modèle longitudinal mixte (dynamique et cinématique)

Des modèles dynamiques pour les véhicules à une et deux roues directrices est donné dans [59]. Nous utilisons le modèle à une roue directrice sans glissement (figure 2.17). Dans ce modèle, le véhicule, qui a deux paires de roues (arrière et avant) a été remplacé par un modèle bicyclette (une roue avant et une roue arrière), en supposant que la différence entre l’orientation de chaque paire de roues est négligeable. Donc, comme pour le modèle cinématique, les roues avant gauche et droite sont représentées par une seule roue. De la même façon, les roues arrière sont représentées par une roue arrière centrale.

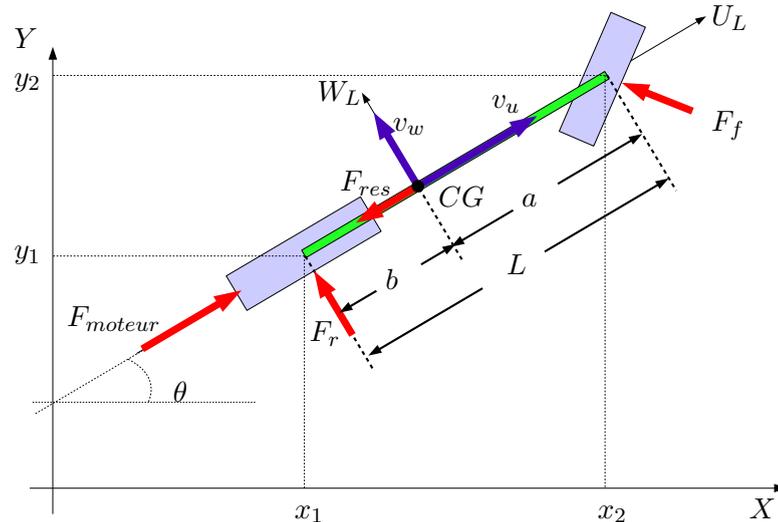


FIGURE 2.17: Modèle bicyclette et forces appliquées

La partie cinématique peut être trouvée en utilisant les contraintes non-holonomes. En considérant que (x, y) est la position du centre de gravité et (x_1, y_1) , (x_2, y_2) sont les positions des roues arrière et avant respectivement, il vient :

$$\begin{aligned} x_1 &= x - b \cos(\theta), y_1 = y - b \sin(\theta) \\ x_2 &= x + a \cos(\theta), y_2 = y + a \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x} + b \dot{\theta} \sin(\theta), \dot{y}_1 = \dot{y} - b \dot{\theta} \cos(\theta) \\ \dot{x}_2 &= \dot{x} - a \dot{\theta} \sin(\theta), \dot{y}_2 = \dot{y} + a \dot{\theta} \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Les contraintes non holonomes (la vitesse latérale pour chaque roue est nulle) donnent :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 \sin(\theta) - \dot{y}_1 \cos(\theta) &= 0 \\ \dot{x}_2 \sin(\theta + \phi) - \dot{y}_2 \cos(\theta + \phi) &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Des équations (2.12) et (2.13) il vient :

$$\begin{aligned} \dot{x} \sin(\theta) - \dot{y} \cos(\theta) + b \dot{\theta} &= 0 \\ \dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) - a \dot{\theta} \cos(\phi) &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Alors, dans le repère du véhicule $[CG, U_L, W_L]$:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_u \cos(\theta) - v_w \sin(\theta) \\ \dot{y} &= v_u \sin(\theta) + v_w \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Les équations (2.14) et la définition (2.15) donnent la partie cinématique du modèle :

$$\begin{aligned} v_w &= \dot{\theta} b \\ \dot{\theta} &= \frac{\tan \phi}{L} v_u \end{aligned} \quad (2.16)$$

La dérivée de la partie cinématique est :

$$\dot{v}_w = \ddot{\theta} b \quad (2.17)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tan\phi}{L} \dot{v}_u + \frac{v_u}{L \cos^2\phi} \dot{\phi} \quad (2.18)$$

Les équations dynamiques suivantes sont tirées de [59], en proposant quelques modifications pour prendre en compte les forces aérodynamiques, de résistance et de gravitation représentées par F_{res} . En utilisant les lois de Newton il vient :

$$\dot{v}_u = v_w \dot{\theta} - \frac{F_f \sin\phi}{m} + \frac{F_{moteur} + F_{res}}{m} \quad (2.19)$$

$$\dot{v}_w = -v_u \dot{\theta} - \frac{F_f \cos\phi}{m} + \frac{F_r}{m} \quad (2.20)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{a F_f \cos\phi}{J} - \frac{b F_r}{J} \quad (2.21)$$

F_{res} est donnée par :

$$F_{res} = -m g \sin\xi - \frac{\rho A C_d}{2} \dot{v}_u^2 \operatorname{sgn}(\dot{v}_u) - d_m \quad (2.22)$$

Dans la suite \dot{v}_u est trouvé en fonction de paramètres du véhicule et des variables d'état.

De (2.21) F_r est donné par :

$$F_r = \frac{a F_f \cos\phi}{b} - \frac{J \ddot{\theta}}{b} \quad (2.23)$$

En substituant les équations (2.17) et (2.23) dans (2.20) il vient :

$$\ddot{\theta} b = -v_u \dot{\theta} + \frac{F_f \cos\phi}{m} + \frac{a F_f \cos\phi}{b m} + \frac{J \ddot{\theta}}{b m} \quad (2.24)$$

(2.24) donne F_f :

$$F_f = \frac{b^2 m + J}{L \cos \phi} \ddot{\theta} + \frac{b m}{L \cos \phi} v_u \dot{\theta} \quad (2.25)$$

En substituant les équations (2.16), (2.18) et (2.25) dans (2.19), il vient :

$$\dot{v}_u = \frac{L^2}{(L^2 m + (b^2 m + J) \tan^2 \phi)} (F_{moteur} + F_{res}) + \frac{(b^2 m + J) \tan \phi}{\cos^2 \phi (L^2 m + (b^2 m + J) \tan^2 \phi)} v_u \dot{\phi} \quad (2.26)$$

ce qui peut être écrit sous la forme :

$$\dot{v}_u = \alpha_1 (F_{moteur} + F_{res}) + \alpha_2 \dot{\phi} \quad (2.27)$$

où :

$$\alpha_1 = \frac{L^2}{(L^2 m + (b^2 m + J) \tan^2 \phi)} \quad , \quad \alpha_2 = \frac{(b^2 m + J) \tan \phi}{\cos^2 \phi (L^2 m + (b^2 m + J) \tan^2 \phi)} v_u$$

Avec la condition $\phi \neq \frac{\pi}{2} + k \pi$, $k = 1, 2, \dots$. Cette condition est toujours satisfaite parce que l'angle maximum de braquage est toujours inférieur à $\frac{\pi}{2}$.

Pour un véhicule roulant sur une voie nécessitant un faible braquage (i.e. les autoroutes...) l'angle de direction et ses changements sont très petits et leurs effets peuvent être négligés dans l'équation (2.27), ça donne le modèle classique pour la dynamique longitudinale du véhicule :

$$\dot{v}_u = \frac{1}{m} (F_{moteur} + F_{res}) \quad (2.28)$$

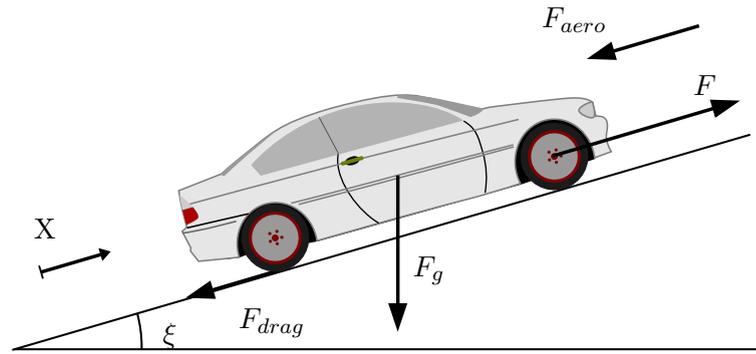


FIGURE 2.18: Les force appliquées sur le véhicule

Ce modèle a été souvent utilisé pour la commande longitudinale d'un convoi sur autoroute [2, 6, 32, 40] en supposant qu'il est découplé de la dynamique latérale pour de faibles angles de direction.

2.2.6.5 Couplage et découplage entre la dynamique longitudinale et la dynamique latérale

Pour commander un convoi, les couplages entre les dynamiques latérale et longitudinale de chaque véhicule doivent être vérifiés. Selon le modèle d'ellipse de traction [37], les forces de traction du pneu sont limitées par l'ellipse de traction (figure 2.12). Ces limites peuvent apparaître lors de certaines manœuvres qui impliquent des forces latérales relativement élevées, ou quand les mouvements du châssis provoquent des transferts de charge. Ceux-ci sont généralement rencontrés dans des conditions d'urgence ou de conduite très sportive, et ne sont pas rencontrés lors de la conduite de véhicules à basse vitesse dans les zones urbaines.

Une étude du couplage entre les deux dynamiques a été effectuée dans [44]. Les résultats prouvent que l'effet de couplage apparaît pour des accélérations modérées (i.e. $< 2m/s^2$) à élevées. Ainsi, en pratique, le couplage pendant les applications typiques sur chaussée rigide peut être négligé. La nécessité de la commande couplée apparaît au cours de manœuvres transitoires (changement de voie, entrée/sortie, freinage ...). La figure 2.19 provient de cette étude. Dans cette figure, les régions correspondant aux différents modes de travail du véhicule (normal, transitoire, freinage d'urgence) sont montrées, et les pourcentages de couplage entre les deux dynamiques dans ces régions sont également donnés.

En supposant une conduite normale (non sportive), le couplage précédent peut être ignoré. Mais un autre couplage apparaît entre les modèles latéral et longitudinal. Ce couplage apparaît dans le modèle cinématique (2.9) et le modèle dynamique longitudinal

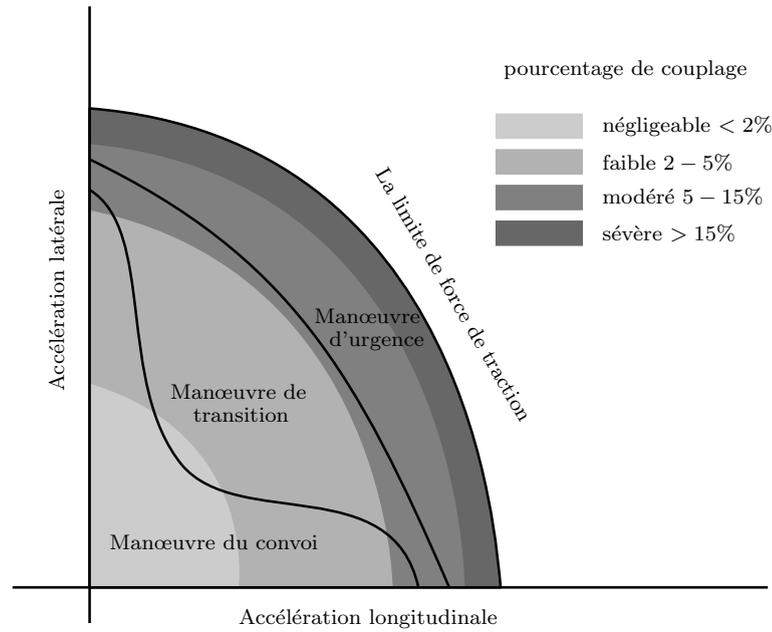


FIGURE 2.19: Les régions de couplage entre les dynamiques latérale et longitudinale [44]

(2.27) entre la dynamique latérale représentée par θ, \dot{y}, ϕ et la dynamique longitudinale représentée par \dot{S}, v_u .

Le découplage des deux dynamiques est simple et direct pour le modèle cinématique (2.8) dans le cas d'une utilisation à faible vitesse [60, 61] en transformant le système en un système chaîné linéaire et découplé [62]. D'autres chercheurs ont considéré que les deux dynamiques sont découplées pour les faibles vitesses [63, 64]. Ils ont simplement développé la commande longitudinale et la commande latérale séparément (figure 2.20) en utilisant une commande floue pour un véhicule de golf qui roule à une vitesse maximale de 7 m/s . Lorsque la vitesse augmente, il devient plus difficile de dissocier les deux dynamiques car le modèle dynamique pour la commande longitudinale est généralement utilisé. Toutefois, dans les applications sur autoroute, la faible courbure permet de supposer que les deux dynamiques sont découplées. Il en découle que les lois de commande longitudinale et latérale sont établies de façon indépendante [65]. Dans (2.27) il est clair que cette proposition est raisonnable pour de faibles courbures et donc faibles angles de direction, ce qui permet de proposer que $\phi \approx 0$ dans (2.27). Il en découle (2.28).

Pour les applications dans des zones urbaines, dans [46] il est proposé un modèle latéral en supposant que celui-ci est suffisamment indépendant du modèle longitudinal. D'autres chercheurs ont construit des contrôleurs latéral et longitudinal de manière indépendante, et les paramètres du contrôleur latéral ont été calculés pour chaque vitesse, formant ainsi une table de correspondance [14, 45, 66].

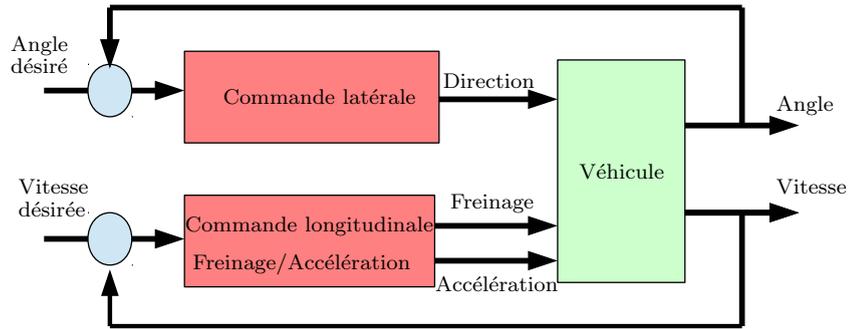


FIGURE 2.20: Un modèle longitudinal et latéral découplé

2.2.7 Linéarisation exacte de modèles et découplage

La linéarisation exacte est une technique pour transformer les systèmes non-linéaires, en des systèmes linéaires (partiellement ou complètement) équivalents en changeant les variables et les entrées du système, ce qui permet d'utiliser une commande linéaire. Cette transformation est une transformation exacte sans aucune approximation, mais qui comporte des conditions sur les changements de variables et leur propriétés. Dans la suite, la technique de linéarisation entrée/sortie est présentée. Puis elle est utilisée pour linéariser les modèles suivants :

- Linéarisation exacte du modèle cinématique pour le comportement latéral
- Linéarisation exacte et découplage des modèles cinématique latéral et dynamique longitudinal
- Linéarisation exacte de la dynamique longitudinale

2.2.7.1 La technique de linéarisation entrée/sortie

Considérons un système non linéaire de la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{2.29}$$

Pour ce système, la linéarisation entrée/sortie consiste à trouver, quand c'est possible [67] :

- un retour d'état $u = \alpha(x) + \beta(x) W$
- un changement de variables d'état $Z = \varphi(x)$

tels que, après transformation et bouclage, le système doit s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \dot{Z}_1 &= A Z_1 + B W \\
 \dot{Z}_2 &= \Psi(Z_1, Z_2) \\
 y &= C z_1 \\
 \text{avec } Z &= (Z_1, Z_2), \quad W = (W_1, W_2, \dots, W_k)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

où A, B sont en forme commandable canonique.

Pour un système multivariable il vient :

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & & 0 \\ & A_{22} & \\ & & \dots \\ 0 & & \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(r_1 \times r_1)}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(r_1 \times 1)} \tag{2.32}$$

où r_i est le degré relatif de la sortie y_i . Après transformation de coordonnées et bouclage statique, les sorties deviennent k chaînes d'intégrateurs découplées de longueurs r_i (figure 2.21).

$$y_1^{(r_1)} = W_1, \quad \dots, \quad y_k^{(r_k)} = W_k \tag{2.33}$$

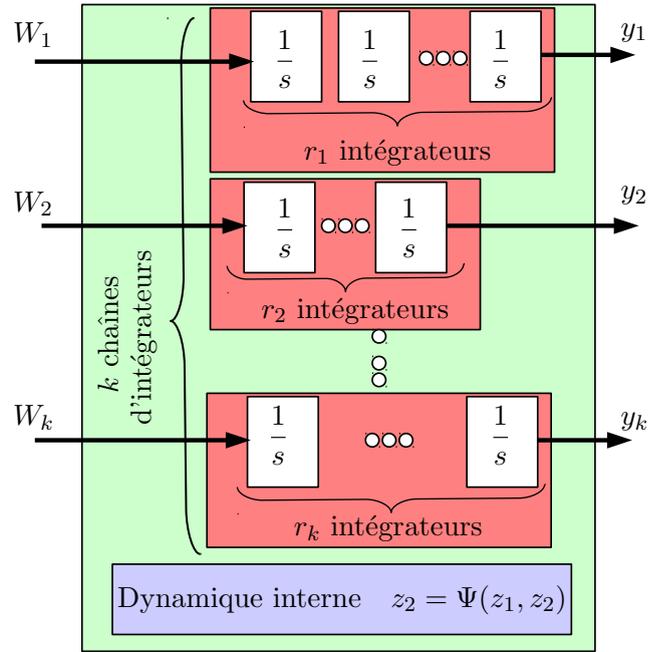


FIGURE 2.21: k chaînes d'intégrateurs découplés de longueurs r_i .

Pour un système monovariante :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (2.35)$$

La sortie devient :

$$y^{(r)} = W(x) \quad (2.36)$$

Donc un système linéaire de r intégrateurs est obtenu, pour lequel la commande linéaire peut être utilisée.

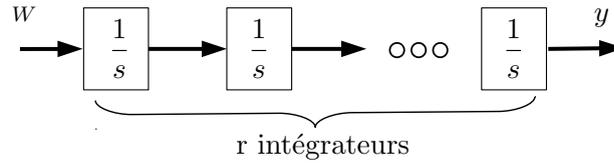


FIGURE 2.22: Système linéaire (r intégrateurs)

Il est clair que z_1 (la sortie et ses dérivées) ne dépend pas de z_2 , donc z_2 représente la dynamique interne qui est non-observable et difficile à analyser. Cette dynamique apparaît si le degré relatif r , est inférieur à l'ordre du système n .

L'analyse de la dynamique interne est difficile donc il faut étudier la dynamique des zéros ($Z_1 = 0$) :

$$Z_2 = \Psi(0, Z_2) \quad (2.37)$$

En général pour faciliter le problème, une étude de la dynamique des zéros linéarisée $\left. \frac{\partial \Psi}{\partial Z_2} \right|_0$ doit être faite et les valeurs propres de cette dynamique doivent être vérifiées. Si la dynamique des zéros n'est pas stable, alors la commande du système ne sera pas stable.

Pour faire la linéarisation entrée/sortie pour le système (2.29), il faut trouver la dérivée première de y (en considérant que u et y sont scalaires) :

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x) u = L_f^1(h) + L_g(h) u \quad (2.38)$$

Si $L_g(h) = 0$, il faut continuer à calculer les dérivées de y jusqu'à ce que la entrée u apparaisse.

il vient :

$$\begin{aligned}
y &= h(x) = L_f^0(h) \\
\dot{y} &= L_f^1(h) + L_g(h) u = L_f^1(h) \quad \text{avec } L_g(h) = 0 \\
\ddot{y} &= L_f^2(h) + L_g(L_f^1(h)) u = L_f^2(h) \quad \text{avec } L_g(L_f^1(h)) = 0 \\
&\dots \\
y &= L_f^r(h) + L_g(L_f^{r-1}(h)) u = v \quad \text{avec } L_g(L_f^{r-1}(h)) \neq 0
\end{aligned} \tag{2.39}$$

En choisissant :

$$\begin{aligned}
\alpha_f(x) &= L_f^r(h) \\
\beta_f(x) &= L_g(L_f^{r-1}(h))
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Alors :

$$\begin{aligned}
y^{(r)} &= L_f^r(h) + L_g(L_f^{r-1}(h)) u \\
&= \alpha_f(x) + \beta_f(x) u \quad \text{où } \beta_f(x) \neq 0 \\
&= W(x)
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Si $r = n$ le système devient totalement linéaire. Mais si $r < n$, il y a présence d'une dynamique interne.

Le changement de coordonnées suivant est choisi :

$$\dot{Z}_1 = \begin{cases} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \dots \\ z_r \end{cases} \quad \text{où} \quad \begin{cases} z_1 \equiv y = L_f^0(h) \\ z_2 \equiv \dot{y} = L_f^1(h) \\ z_3 \equiv \ddot{y} = L_f^2(h) \\ \dots \\ z_r \equiv y^{(r-1)} = L_f^{r-1}(h) \end{cases} \tag{2.42}$$

Il en résulte une première partie linéaire :

$$\dot{Z}_1 = A Z_1 + B W \quad (2.43)$$

où A et B sont la forme commandable canonique :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] Z_1 \quad (2.45)$$

Pour la dynamique interne, il faut trouver la dynamique des zéros $Z_2 = \Psi(0, Z_2)$ et puis vérifier sa stabilité.

Dans [67], il est listé un certains nombre de limites à la technique :

- Nécessite d'un modèle idéal du système avec ses dérivées (ce qui peut générer un problème de robustesse, qui peut cependant être résolu en introduisant des termes qui augmentent la robustesse [68]).
- Perte de "commandabilité" (singularités, accessibilité),
- La dynamique interne z_2 peut être instable (pas toujours grave).

2.2.7.2 Linéarisation exacte du modèle cinématique pour le comportement latéral

La technique de linéarisation entrée/sortie est utilisée pour linéariser le modèle cinématique latéral (2.9) en supposant qu'il est découplé de la dynamique longitudinale[5].

Pour un système de direction donnée par (2.6), l'équation (2.9) devient :

$$\ddot{\theta}_p = -\frac{1}{\tau_s} \alpha_5 \phi + \alpha_7 + \alpha_6 \dot{v}_u + c_2 \alpha_5 u_2 \quad (2.46)$$

ce qui peut être écrit :

$$\ddot{\theta}_p = \beta_1 + \beta_2 u_2 \quad (2.47)$$

où

$$\beta_1 = -\frac{\alpha_5}{\tau_s} \phi + \alpha_6 \dot{v}_u + \alpha_7, \quad \beta_2 = \alpha_5 c_2 \quad (2.48)$$

Cette équation peut être linéarisée en prenant W_2 comme *nouvelle entrée*, ce qui donne un système linéaire de la forme suivante :

$$\ddot{\theta}_p = W_2 \quad (2.49)$$

avec la condition $v_u \neq 0$ (pour assurer que $\beta_2 \neq 0$).

2.2.7.3 Linéarisation exacte et découplage des modèles cinématique latéral et dynamique longitudinal

Pour un système avec une entrée u_1 égale à la force du moteur $u_1 = F_{moteur}$, et un système de direction du premier ordre (2.6), le modèle dynamique longitudinal (2.27) devient :

$$\dot{v}_u = \alpha_1 F_{res} - \frac{1}{\tau_s} \alpha_2 \phi + \alpha_1 u_1 + c_2 \alpha_2 u_2 \quad (2.50)$$

Le modèle latéral donné par (2.9) devient :

$$\ddot{\theta}_p = -\frac{1}{\tau_s} \alpha_5 \phi + \alpha_7 + \alpha_6 \dot{v}_u + c_2 \alpha_5 u_2 \quad (2.51)$$

en remplaçant \dot{v}_u dans (2.51) il vient :

$$\ddot{\theta}_p = -\frac{1}{\tau_s} \alpha_5 \phi + \alpha_7 + \alpha_6 \alpha_1 F_{res} - \frac{1}{\tau_s} \alpha_6 \alpha_2 \phi + \alpha_6 \alpha_1 u_1 + c_2(\alpha_6 \alpha_2 + \alpha_5) u_2 \quad (2.52)$$

Donc le système peut être écrit sous la forme suivante :

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} v_u \\ \dot{v}_u \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_p \\ \dot{d} \end{pmatrix} = f(X) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 \cdot c_2 \\ 0 & 0 \\ \alpha_6 \cdot \alpha_1 & c_2(\alpha_5 + \alpha_2 \cdot \alpha_6) \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

$$f(X) = \begin{pmatrix} v_u \\ \alpha_1 F_{res} - \frac{1}{\tau_s} \alpha_2 \phi \\ \dot{\theta}_p \\ -\frac{1}{\tau_s} \alpha_5 \phi + \alpha_7 + \alpha_6 \alpha_1 F_{res} - \frac{1}{\tau_s} \alpha_6 \alpha_2 \phi \\ \sin \theta_p v_u \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ \theta_p \end{pmatrix}$$

Le système peut être linéarisé en utilisant les nouvelles entrées W_1, W_2 telles que :

$$\begin{cases} y_1^{(r_1)} = \dot{v}_u = W_1 \\ y_2^{(r_2)} = \ddot{\theta}_p = W_2 \end{cases} \quad (2.55)$$

Donc les entrées peuvent être déduites u_1, u_2 et il vient :

$$\begin{cases} u_1 = \beta_1 W_1 + \beta_2 W_2 - (\beta_1 \delta_1 + \beta_2 \delta_2) \\ u_2 = \beta_3 W_1 + \beta_4 W_2 - (\beta_3 \delta_1 + \beta_4 \delta_2) \end{cases} \quad (2.56)$$

où :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{(\alpha_5 + \alpha_2 \alpha_6)}{\alpha_1 \alpha_5}, \quad \beta_2 = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1 \alpha_5} \\ \beta_3 &= -\frac{\alpha_6}{c_2 \alpha_5}, \quad \beta_4 = \frac{1}{c_2 \alpha_5} \\ \delta_1 &= -\frac{\alpha_2}{\tau_s} \phi + \alpha_1 F_{res} \\ \delta_2 &= -\frac{(\alpha_5 + \alpha_2 \alpha_6)}{\tau_s} \phi + \alpha_1 \alpha_6 F_{res} + \alpha_7 \end{aligned} \quad (2.57)$$

avec la condition $\phi \neq \frac{\pi}{2} + k \pi, k = 1, 2, \dots$. Cette condition est toujours satisfaite pour les véhicules.

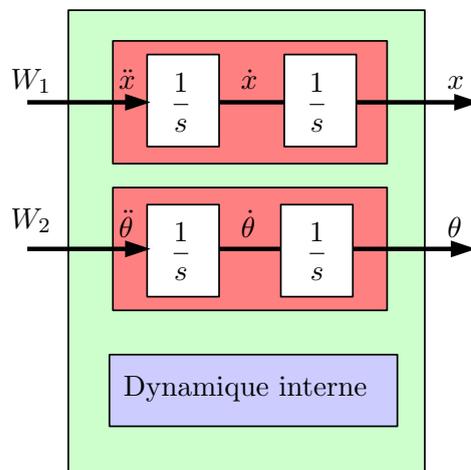


FIGURE 2.23: Commande de véhicule en utilisant le premier modèle

Par changement de coordonnées, le système linéaire suivant est obtenu :

$$\begin{pmatrix} v_u \\ \dot{v}_u \\ \dot{\theta}_p \\ \ddot{\theta}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

Il vient une partie non linéaire qui représente la dynamique interne :

$$\dot{z}_5 = \dot{d}_i = \sin(z_3) z_1$$

La dynamique des zéro $\dot{z}_5 = 0$ de ce système est stable.

2.2.7.4 Linéarisation exacte de la dynamique longitudinale

Le modèle de la dynamique longitudinale donné par (2.27) peut être représenté par la figure 2.24. Ce modèle représente la dynamique longitudinale du véhicule en ignorant l'effet de la dynamique latérale et le retard du moteur du véhicule $F_{moteur} = u$. Ce modèle peut être linéarisé en prenant une nouvelle entrée W pour le système, telle que :

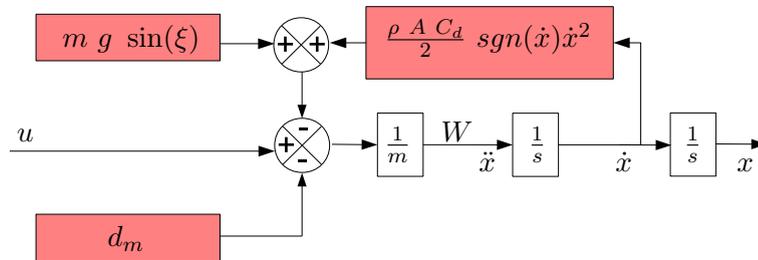


FIGURE 2.24: La dynamique longitudinale **sans** prise en compte du modèle du moteur

$$u = m W - F_{res} \quad (2.59)$$

ce qui donne le système linéaire représenté par la figure 2.25 :

$$\ddot{x} = W \quad (2.60)$$

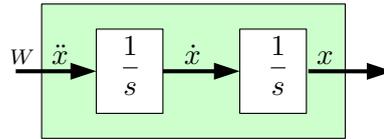


FIGURE 2.25: Un modèle linéarisé du deuxième ordre de la dynamique longitudinale

ce modèle représente un modèle linéarisé de la dynamique longitudinale du véhicule sans prise en compte de la dynamique latérale et du modèle du moteur.

En prenant le modèle simplifié du moteur (2.2) un modèle plus représentatif de la dynamique longitudinale peut être obtenu. Ce modèle peut être linéarisé en dérivant l'équation (2.28), et en utilisant (2.2). il vient :

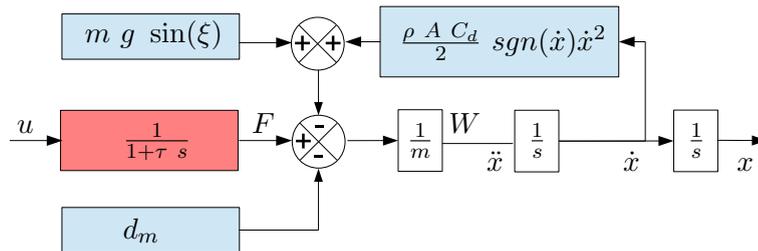


FIGURE 2.26: La dynamique longitudinale en prenant en compte un modèle simplifié du moteur

$$m \ddot{x} = -F_{moteur}/\tau - m g \cos(\xi) \dot{\xi} - \rho A C_d \dot{x} \ddot{x} + u/\tau \tag{2.61}$$

Pour linéariser le système, une nouvelle entrée W peut être choisi comme suit :

$$u = \tau(m W + F_{moteur}/\tau + m g \cos(\theta) \dot{\theta} + \rho A C_d \dot{x} \ddot{x}) \tag{2.62}$$

Ce qui donne le système linéaire suivant, représenté figure (2.27) :

$$\ddot{x} = W \tag{2.63}$$

Ce modèle représente un modèle linéarisé de la dynamique longitudinale du véhicule sans prise en compte la dynamique latérale et en prenant en compte un modèle simplifié du moteur.

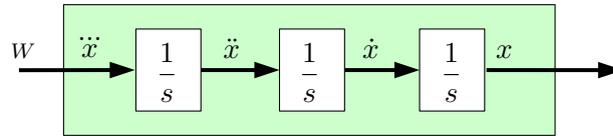


FIGURE 2.27: Un modèle linéarisé de la dynamique longitudinale en prenant en compte un modèle simplifié du moteur

2.3 Modélisation du Convoi

Le convoi se compose de plusieurs véhicules qui se suivent. Le premier véhicule est le leader, qui peut être conduit manuellement ou automatiquement. Les autres véhicules se suivent, se déplaçant à la même vitesse et en gardant une distance désirée entre deux véhicules successifs.

2.3.1 État de l'art

La complexité du modèle longitudinal du convoi augmente selon la loi de commande et les interactions entre les véhicules. Ces interactions peuvent aider à assurer la sécurité et la stabilité, mais elles augmentent également la complexité de la commande et exigent des communications entre véhicules. De nombreux modèles longitudinaux de convois (ressort-amortisseur), allant du convoi sans aucune communication jusqu'à des convois utilisant des services complets de communication entre tous les véhicules, ont été proposés [65, 69].

Usuellement, les connexions (forces) virtuelles entre les véhicules du convoi, sont modélisées par des modèles inspirés de la physique. Ces forces peuvent être dans une direction ou dans les deux, selon la loi de commande (unidirectionnelle ou bidirectionnelle). Dans [70], un modèle connu sous le nom de "bande élastique" est utilisé. Ce modèle consiste en des particules physiques soumises à des forces (figure 2.28). Les attaches immatérielles entre les particules sont modélisées par des ressorts. Ce modèle ne peut pas être utilisé pour la commande longitudinale car les mouvements ne sont pas amortis, et donc le système ne pourra pas se stabiliser. Ce modèle a été utilisé pour contrôler le mouvement latéral afin d'éviter les obstacles. Comme les rayons de courbure doivent être faibles, ce modèle peut être utilisé pour les applications sur autoroute, mais pas dans le cas du trafic urbain.

Le modèle le plus connu est le modèle ressort-amortisseur [69, 71, 72]. Dans ce modèle, les forces attractive/réulsive sont modélisées par un ressort, et les forces d'amortissement sont modélisées par un amortisseur. Le modèle ressort-amortisseur est un système stable, c'est pourquoi il est fréquemment utilisé. Ce modèle peut être bidirectionnel ou unidirectionnel. Le modèle bidirectionnel est donné dans [69, 71], où les forces sur le véhicule

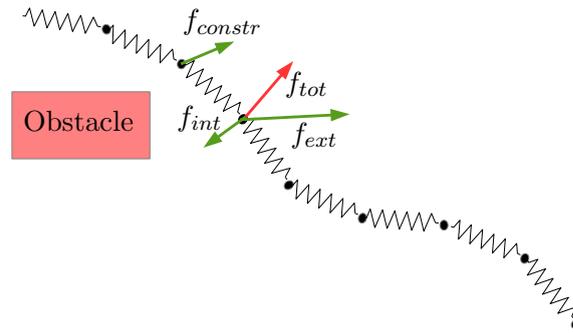


FIGURE 2.28: Modèle de la bande élastique

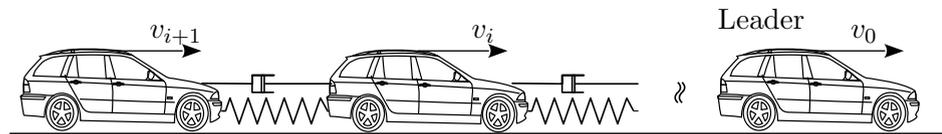


FIGURE 2.29: Modèle ressort-amortisseur bidirectionnel

sont générées par les véhicules prédécesseur et successeur (figures 2.32, 2.29). Le modèle ressort-amortisseur bidirectionnel est stable, mais il faut bien choisir les paramètres de la loi de commande, autrement les perturbations peuvent se propager dans les deux sens du convoi. La stabilité de ce modèle est étudiée dans [69]. Pour le modèle unidirectionnel [69, 72] les forces sur le véhicule sont générées par le véhicule précédent (et parfois le leader), voir figures (2.30, 2.31). Dans ces figures, les ressorts et les amortisseurs sont détachés du véhicule suivant pour exprimer que c'est un modèle unidirectionnel. Il a été montré dans [73] que la stabilité pour un convoi homogène avec des commandes unidirectionnelles avec des forces générées par le véhicule précédent ne peut être assurée si on veut garder une distance désirée fixe entre les véhicules. Pour assurer la stabilité, un amortisseur peut être ajouté entre chaque véhicule et le leader (figure 2.30), ce qui permet d'obtenir un convoi stable. Une autre solution consiste à ajouter une force additionnelle (proportionnelle à la vitesse du véhicule et qui représente une force de friction [74, 75]) pour amortir le mouvement (figure 2.31). Ce dernier modèle peut assurer la stabilité du convoi en utilisant des capteurs embarqués sans aucune utilisation de communication, mais dans ce modèle les distances entre véhicules sont proportionnelles à la vitesse, ce qui diminue son intérêt pratique. Ce modèle TCI est le modèle de commande avec une distance variable, proportionnelle à la vitesse, entre les véhicules.

Pour prendre en compte les deux dynamiques (latérale et longitudinale), plusieurs modèles ont également été proposés. Un modèle local bidirectionnel a été utilisé dans [71], pour les deux commandes (longitudinale et latérale). Le bilan des forces virtuelles agissant sur le véhicule est : la force de liaison virtuelle avec le véhicule précédent \vec{f}_f (la somme des forces du ressort et de l'amortisseur) et la force avec le suivant \vec{f}_r (figure 2.32). La stabilité du modèle a été prouvée en étudiant l'énergie du système. La robustesse aux

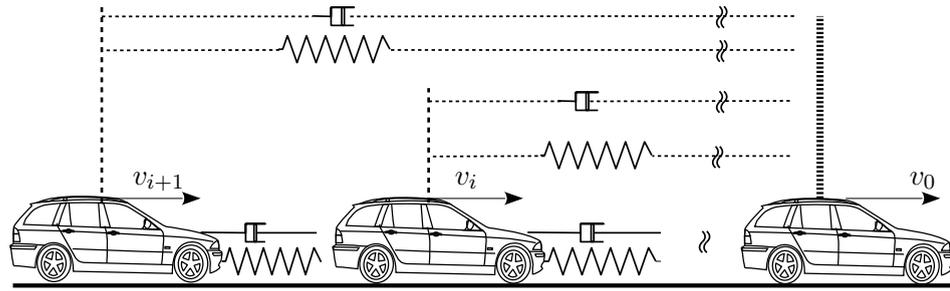


FIGURE 2.30: Modèle ressort-amortisseur unidirectionnel avec un amortisseur entre chaque véhicule et le leader

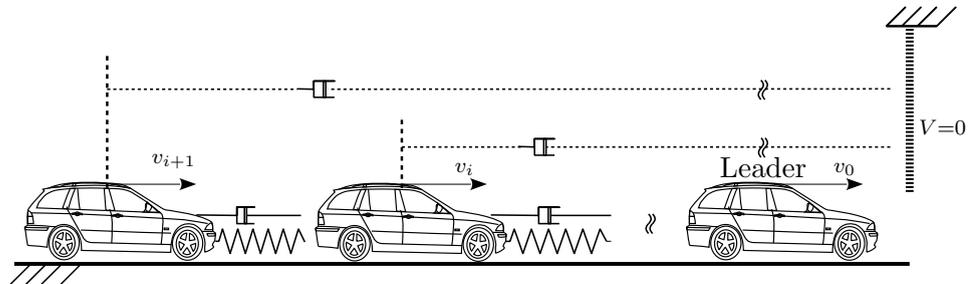


FIGURE 2.31: Modèle ressort-amortisseur unidirectionnel avec un amortisseur entre chaque véhicule et une référence fixe

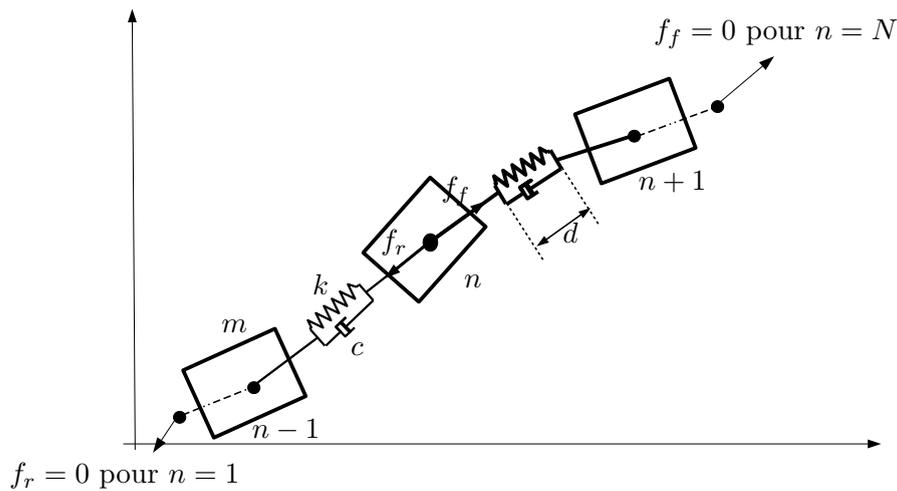


FIGURE 2.32: Modèle ressort-amortisseur à deux dimensions

incertitudes dans le modèle et aux bruits dans les signaux a été vérifiée par simulation [71].

Le modèle proposé dans [76] est une extension du modèle masse-ressort-amortisseur, comme indiqué à la figure (2.33). Ce modèle consiste en deux ressorts et un amortisseur virtuel, un ressort de chaque côté. Les résultats ont été obtenus sur un simulateur pour un convoi de trois véhicules, ce qui ne donne pas une vraie indication de stabilité. L'erreur latérale ne semblait pas stable. Donc une étude plus approfondie doit être faite, avec des simulations plus précises.

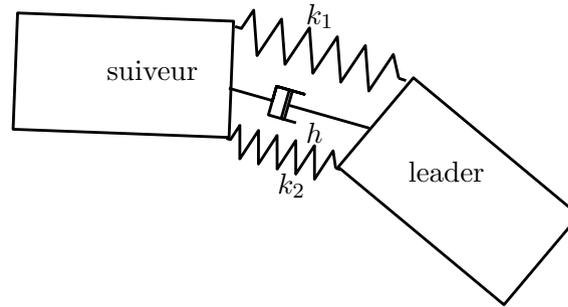


FIGURE 2.33: Modèle double-ressort/amortisseur

Les modèles proposés précédemment et le modèle unidirectionnel proposé dans [75] avec les trois forces virtuelles (ressort, amortisseur et friction) ne sont pas suffisants pour un mouvement sur une trajectoire sinueuse [75]. En effet, dans un virage le système ressort-amortisseur attire le véhicule vers l'intérieur du virage et provoque une erreur d'anticipation (voir figure 2.34). Pour améliorer la réponse du convoi, une autre force a été ajoutée [72, 77]. Cette nouvelle force représente une force de torsion, proportionnelle à l'angle θ et à la distance MA entre les deux véhicules (voir figure 2.35). Cette force est égale à :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{torsion} &= \vec{MA} \wedge \vec{Moment} \\ \vec{Moment} &= k_{torsion} \theta \vec{z}\end{aligned}\tag{2.64}$$

La stabilité de la commande **longitudinale** a été prouvée. La fonction de transfert de l'erreur a été établie et est égale à $\frac{h s + k}{s^2 + h s + k}$. Une condition de stabilité a été donnée sous la forme $0 < k \leq \frac{m \omega^2}{2}$, où k et h sont les paramètres de la loi de commande et m est la masse, mais cette condition n'est pas valable pour les faibles fréquences ($\omega \approx 0$).

Les forces virtuelles entre les véhicules sont aussi modélisées comme des forces newtoniennes [74, 78, 79], auxquelles s'ajoutent d'autres forces pour prendre en compte les conditions de l'environnement réel. Ces forces sont : la force d'attraction de Newton entre chaque véhicule et son prédécesseur, la force d'amortissement et la force de friction. En utilisant ce modèle, [78] présente des résultats meilleurs que ceux du modèle local bidirectionnel [71].

Une autre façon de traiter le problème est d'utiliser un système multi-agents. Les Systèmes Multi-Agents sont un outil informatique pour une modélisation centrée sur l'individu. Ils permettent de considérer les interactions entre des individus et les autres membres d'une organisation situés dans le même espace. Ces interactions peuvent être modélisées

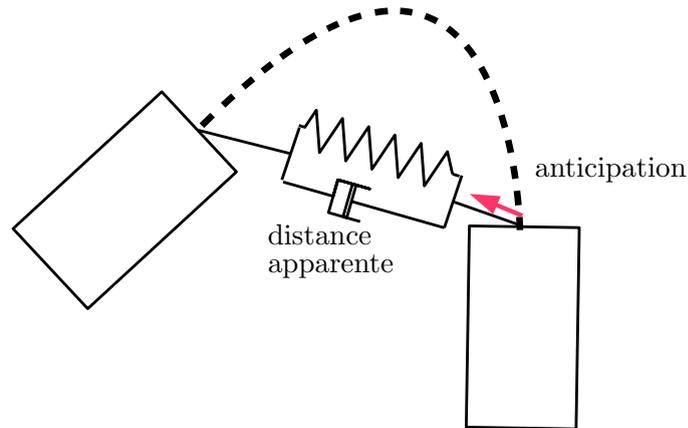


FIGURE 2.34: L'erreur d'anticipation pour le modèle ressort-amortisseur à deux dimensions

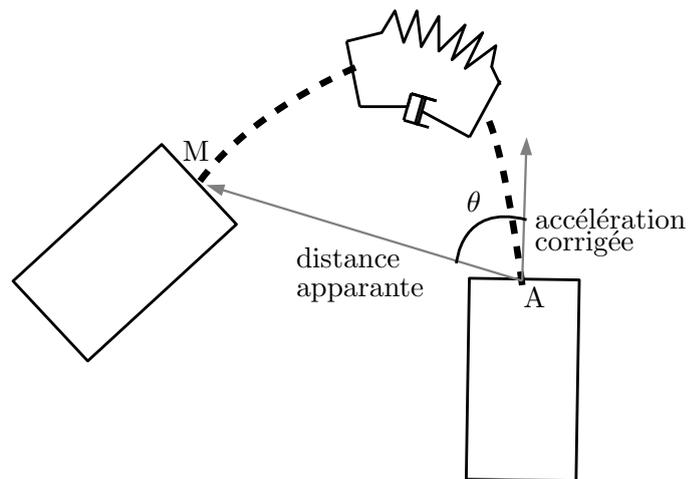


FIGURE 2.35: Correction d'erreur d'anticipation pour le modèle ressort-amortisseur à deux dimensions

par un modèle inspiré de la physique [72, 74, 75], du comportement des animaux [80] ou même du comportement des humains.

Dans [72, 74, 75] les Systèmes Multi-Agents sont utilisés pour modéliser le convoi et l'arrimage immatériel entre les véhicules. Chaque véhicule du convoi est considéré comme un agent réactif capable de percevoir son environnement et de réagir en gardant une distance souhaitable avec le véhicule qui le précède (et parfois qui le suit). Dans ce cas, la conduite en convoi est le résultat des interactions directes entre chaque véhicule et ses prédécesseur et successeur.

Donc il existe plusieurs modèles pour le convoi. Le modèle ressort-amortisseur est le modèle le plus connu. Ce modèle représente les forces entre les véhicules comme une force attractive/répulsive selon les distances entre véhicules, et une autre force (amortissement) qui dépend de la différence entre les vitesses des véhicules.

Malgré la simplicité de ce modèle et la stabilité obtenue, la réponse de CTI n'est pas

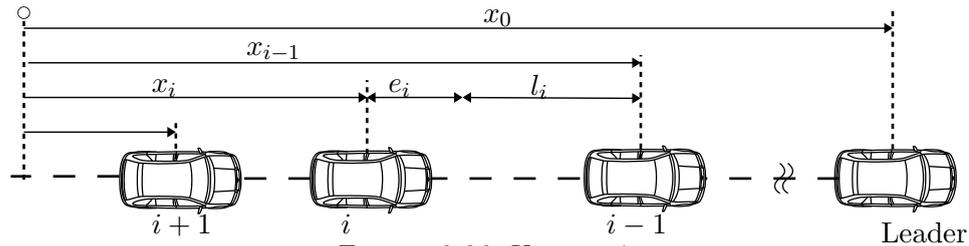


FIGURE 2.36: Un convoi

satisfaisante car les distances entre véhicules sont proportionnelles à la vitesse. D'un autre côté, la stratégie de distance constante entre véhicules demande une communication robuste pour assurer la stabilité, qui augmente le coût du système. Il y a donc un intérêt à rechercher un nouveau modèle ou des adaptations aux modèles existants.

2.3.2 Modèle longitudinal proposé (convoi sur autoroute)

Dans le modèle ressort-amortisseur, la stabilité du convoi dépend des interactions entre véhicules. Pour le cas unidirectionnel, elle dépend de la réaction des véhicules suivants à l'erreur avec le véhicule précédent. La stabilité dépend des distances et des vitesses relatives des véhicules et ne dépend pas du mouvement d'ensemble des véhicules, qui peut être considéré comme la dynamique du convoi. Les modèles qui sont déjà proposés ne séparent pas la dynamique des véhicules de la dynamique globale du convoi, ce qui impose des sur-contraintes sur la réponse pour obtenir la stabilité (la distance entre véhicules pour TCI, la communication pour les distances fixes entre véhicules). Dans la suite, nouveau modèle est proposé, qui sépare les deux dynamiques, ce qui permet de traiter la stabilité **interne** du convoi (interactions entre-véhicules) **quasiment** séparément de la dynamique du convoi. Cette idée augmente considérablement l'intérêt de la TCI.

Pour la dynamique latérale le modèle ressort-amortisseur est aussi utilisé, qui donne une réponse stable.

Pour les applications sur autoroute, les paramètres d'état sont définis dans un plan euclidien. En supposant un modèle de type masse ponctuelle pour tous les véhicules, les paramètres suivants sont définis (figure 2.36) :

- l_i : distance désirée entre véhicules.
- x_i : position du véhicule i .
- \dot{x}_i : vitesse linéaire du véhicule i .
- $e_i = x_{i-1} - x_i - l_i$: erreur d'espacement entre le véhicule i et le véhicule $i - 1$.

Considérons un camion virtuel roulant à la vitesse V . Une force virtuelle entre chaque véhicule et ce camion est ajoutée, comme indiqué figure 2.37.

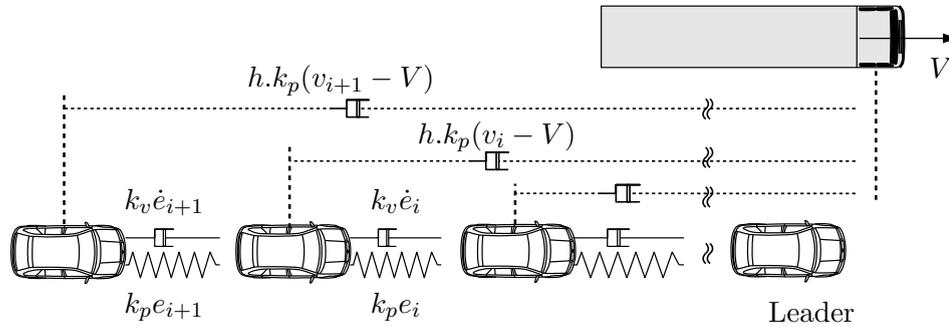


FIGURE 2.37: Modèle longitudinal avec un camion virtuel

Dans le chapitre suivant la stabilité de ce modèle sera démontrée. Il est exactement équivalent au modèle de la figure 2.38 pour un observateur externe sur la route. Il a été appelé modèle de "Convoi sur Plateau", ou en anglais "Flatbed Tow Truck Model". Il se compose pour chaque véhicule d'un ressort et deux amortisseurs. L'allongement du ressort dépend des distances entre véhicules, et génère une force d'attraction lorsque la distance inter-véhicules est plus grande que la distance désirée, et une force de répulsion si elle est plus petite. La force générée par le premier amortisseur (représenté en traits pleins) dépend de la différence de vitesse linéaire entre deux véhicules consécutifs. La force générée par le deuxième amortisseur (représenté en traits pointillés) dépend de la différence entre la vitesse linéaire du véhicule et une vitesse de référence (par exemple la vitesse du leader du convoi). Cet amortisseur assurera la stabilité du convoi. Il est représenté en traits pointillés pour indiquer que la vitesse de référence est mise à jour à une fréquence plus faible que les autres variables.

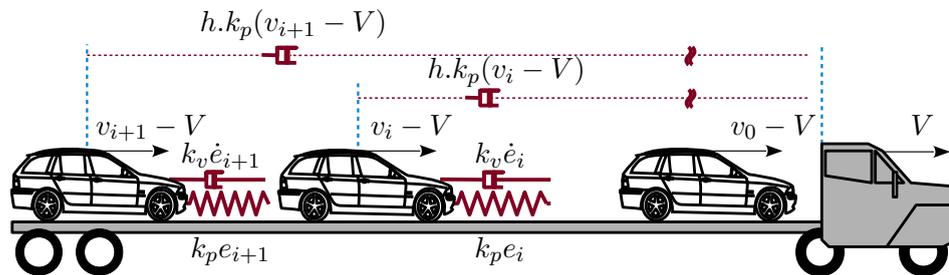


FIGURE 2.38: Modèle proposé "Flatbed tow truck"

Ce modèle est une modification du modèle donné figure 2.31 en prenant $V \neq 0$. Cette modification a un effet important sur la performance du système. Pour un observateur interne (le chauffeur du camion) le convoi, chargé sur le camion, devient équivalent au modèle donné dans figure 2.31, mais avec des vitesses relatives $v_i - V$ (pour le i -ème véhicule) beaucoup plus faibles que la vitesse absolue v_i . Donc les distances entre véhicules deviennent proportionnelles à la vitesse relative $v_i - V$, ce qui réduit considérablement les inter-distances.

La présentation du camion virtuel dans le modèle permet de séparer deux dynamiques dans le convoi :

- La dynamique lente du convoi dans sa totalité. Cette dynamique est représentée par le paramètre V . Ce paramètre a un effet important sur les distances entre véhicules, et donc sur la capacité routière. Sa valeur peut être choisie pour réduire les distances inter-véhicules, comme il sera montré dans le chapitre suivant.
- La dynamique rapide des véhicules. Cette dynamique est la dynamique des erreurs d'espacement et leurs dérivées. Elle représente les interactions internes entre les éléments du convoi, et a un effet très important sur la stabilité et la sécurité du convoi.

Dans le chapitre 4, la stabilité de ce modèle sera montrée mais cette stabilité autour des basses fréquences est une stabilité faible (les erreurs ne croissent pas, mais elles ne diminuent plus). Une autre modification sur ce modèle a été effectuée afin de pallier cet inconvénient, en ajoutant une nouvelle force virtuelle (ressort) proportionnelle à la distance entre le véhicule et le camion (voir figure 2.39). Ce modèle assure un convoi plus stable sans besoin supplémentaire de communication.

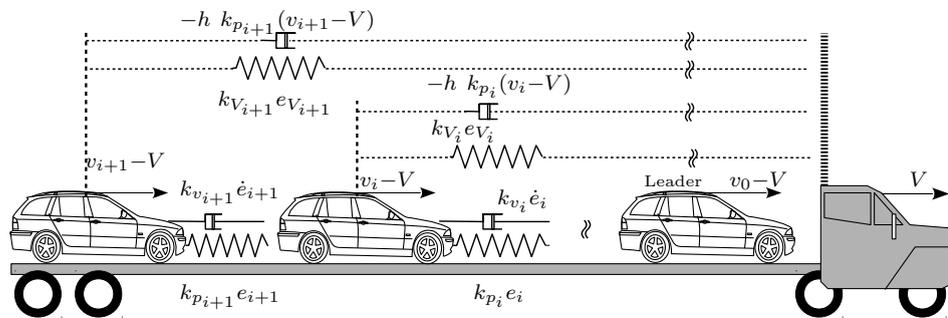


FIGURE 2.39: Modèle "Flatbed Tow Truck" amélioré

2.3.3 Un modèle des convois sur train

Le modèle de Convoi sur Plateau peut être généralisé en considérant un train virtuel roulant à vitesse V_t (voir figure 2.40). Le paramètre V_t représente la dynamique du trafic en général, donc il peut changer selon l'état du trafic. Il représente aussi la vitesse désirée du leader de chaque convoi et donc il définit la valeur de V . Ce nouveau modèle permet de construire un convoi stable de camions, chaque camion correspondant à un sous-convoi stable de véhicules. De cette façon, on met en évidence les deux dynamiques du système : la dynamique du trafic représentée par le convoi (macroscopique) et la dynamique des interactions internes à un convoi (microscopique).

La dynamique du convoi représente une dynamique auxiliaire, qui peut aider à réduire les distances inter-véhicules. Ceci peut aussi être fait à l'aide du seul modèle du train, mais au prix d'un convoi très long. Mais l'intérêt essentiel de couper les longs convois en sous-convois est que c'est plus pratique et plus facile à gérer.

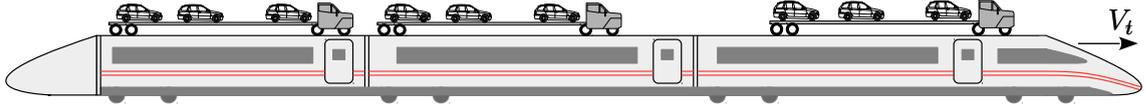


FIGURE 2.40: Modèle convois sur train

2.3.4 Modèle longitudinal proposé (pour des milieux urbains)

Dans le contexte urbain les courbures sont plus importantes, mettant en défaut les distances inter-véhicules cartésiennes (la distance cartésienne peut devenir une fonction non monotone). Pour pallier ce défaut, les distances curvilignes seront utilisées. En supposant un modèle de type masse ponctuelle pour tous les véhicules, les paramètres curvilignes suivants sont définis (figure 2.41) :

- l_i : distance curviligne désirée entre véhicules.
- S_i : abscise curviligne du véhicule i .
- \dot{S}_i : vitesse curviligne du véhicule i .
- $e_i = S_{i-1} - S_i - l_i$: erreur curviligne d'espacement entre le véhicule i et le véhicule $i - 1$.

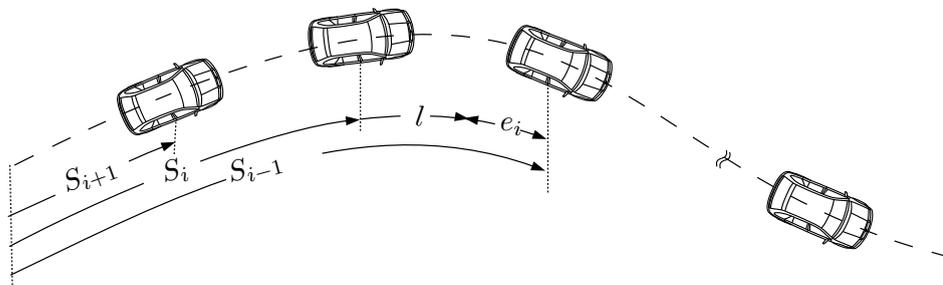


FIGURE 2.41: Modèle longitudinal du convoi sur route sinueuse

Ainsi, un nouveau modèle longitudinal est proposé en appliquant les mêmes modifications qui sont effectuées pour les convois dans des milieux routier utilisant le paramétrage cartésien.

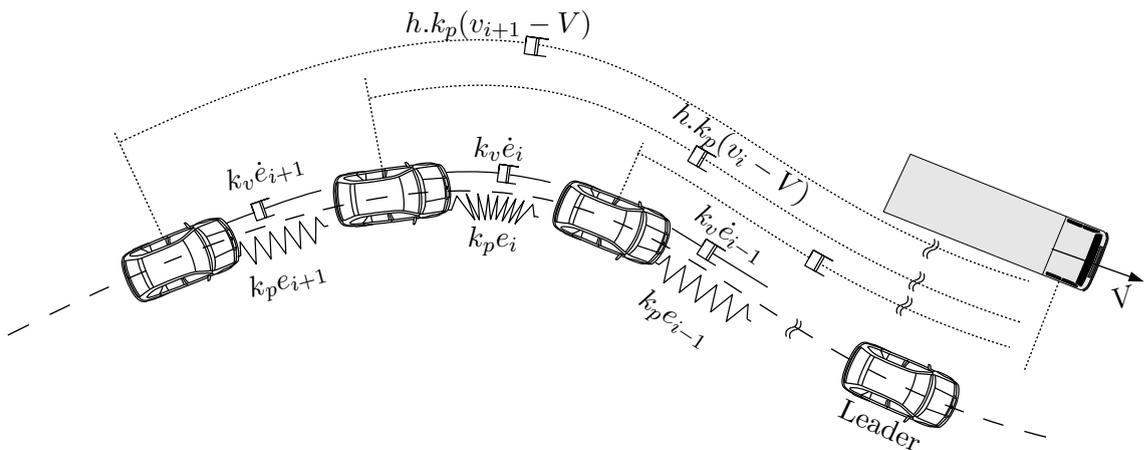


FIGURE 2.42: Modèle du camion sur route sinueuse avec un camion virtuel

La figure 2.42 présente ce nouveau modèle, qui se compose pour chaque véhicule d'un ressort et deux amortisseurs. L'allongement du ressort dépend des distances curvilignes entre véhicules, et génère une force d'attraction lorsque la distance inter-véhicules est plus grande que la distance curviligne désirée, et une force de répulsion si elle est plus petite. La force générée par le premier amortisseur (représenté en traits pleins) dépend de la différence de vitesse entre deux véhicules consécutifs. La force générée par le deuxième amortisseur (représenté en traits pointillés) dépend de la différence entre la vitesse du véhicule et une vitesse de référence (par exemple la vitesse du leader du convoi). Cet amortisseur assurera la stabilité du convoi. Il est représenté en traits pointillés pour indiquer que la vitesse de référence est mise à jour à une fréquence plus faible que les autres variables.

2.3.5 Modèle latéral proposé

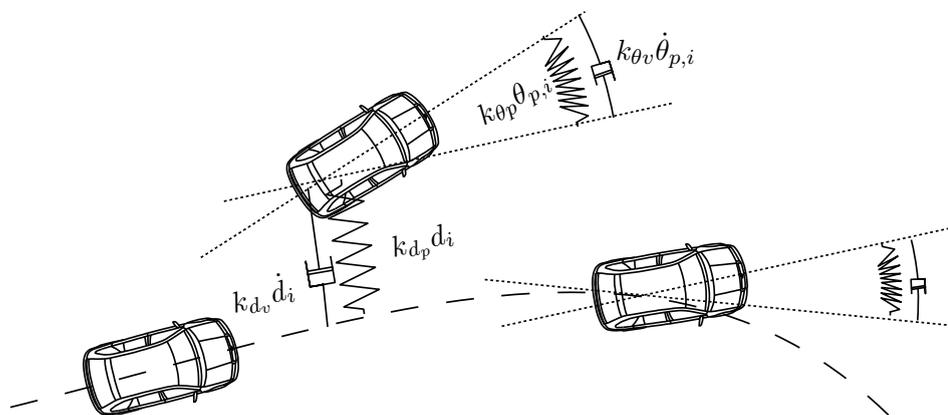


FIGURE 2.43: Modèle latéral proposé du convoi

Le modèle latéral proposé comporte deux systèmes masse-ressort, afin de régler :

- l'erreur latérale,

- l'erreur angulaire

par rapport au chemin suivi par le leader, comme illustré sur la figure 2.43.

L'allongement du premier ressort dépend de l'erreur angulaire θ_{pi} ; il agit comme un moment attractif vers zéro. Le moment généré par le premier amortisseur dépend de la dérivée de cette erreur ($\dot{\theta}_{pi}$). Finalement, l'action du deuxième ensemble ressort-amortisseur est fonction de l'erreur latérale d_i et de sa dérivée \dot{d}_i , ce qui entraîne le véhicule vers la trajectoire.

2.4 Modèles de simulation

2.4.1 Le modèle du véhicule sous Matlab

Un modèle simple est construit sous Matlab pour le modèle linéarisé. Ce modèle est constitué de doubles intégrateurs et deux limiteurs (un limiteur de vitesse et un limiteur d'accélération/décélération), six entrées et trois sorties. Les entrées sont l'information du véhicule précédent "prevCar", le véhicule lui-même "car", le leader "leader", l'indice du véhicule dans le convoi "carIndex" et l'information du véhicule suivant "nextCar", et enfin la position initiale x_0 . Les sorties sont la position x , la vitesse v , l'accélération \ddot{x} . Ce modèle a été étendu pour prendre en compte les retards du moteur, les délais capteurs et les délais de la communication, et sera utilisé dans chapitre 4. La commande a été construite dans la "correcteur".

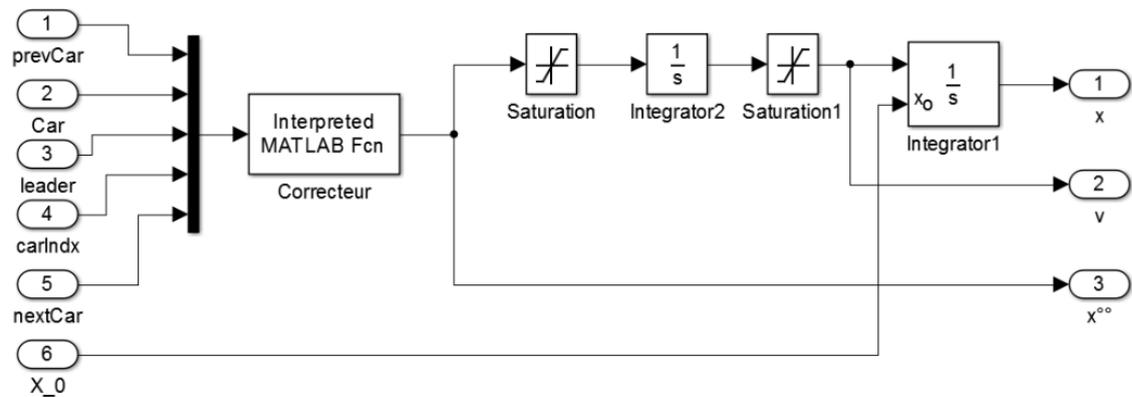


FIGURE 2.44: Modèle longitudinal d'un véhicule au sein d'un convoi sous Matlab

2.4.2 Le modèle du véhicule dans TORCS

TORCS (The Open Racing Car Simulator [81]) est un jeu et un simulateur avancé utilisé dans les milieux académiques. Il a un moteur physique sophistiqué (aérodynamique,

traction, consommation de carburant...), et possède en outre un moteur 3D pour la visualisation (figure 2.45).



FIGURE 2.45: TORCS

Le modèle n'est pas très complexe, mais il est suffisant pour vérifier les lois de commande et leur stabilité. Le point le plus faible dans les modèles des sous-systèmes est que les retards d'actionnement ou de capteur ne sont pas pris en compte, ce qui peut donner une réaction instantanée donc une réponse pas réaliste. Pour résoudre ce problème, des retards sont ajoutés sur quelques systèmes (système de direction, moteur...).

Le modèle du véhicule prend en compte toutes les forces et les couples externes (traînée, aérodynamique, gravitation...), et les forces et couples internes générés par le moteur, le système de freinage et les effets d'inertie. De plus, un modèle complexe des roues, des pneus et du système d'amortisseur (ressort, amortisseur, rigidité...) ont été aussi définis. Le modèle d'interaction roue/sol est le modèle bien connu de Pacejka, ou "formule magique". De plus, l'effet des dégâts dus aux collisions sur la dynamique du véhicule a aussi été pris en compte en utilisant un modèle simplifié des collisions ¹...

Les modèles les plus importants implémentés dans TORCS sont présentés à l'annexe C.

2.4.3 Conclusion

Ce chapitre se compose en deux parties principales : la première partie est la modélisation de la dynamique du véhicule et la deuxième partie est la modélisation du convoi. Dans la première partie, les dynamiques les plus importantes du véhicule sont présentées, qui doivent être prises en compte. Puis différents modèles pour le mouvement du véhicule en général (un modèle cinématique, dynamique, dynamique étendu et un modèle pour la dynamique longitudinale) sont présentés. Les avantages et les désavantages de chaque modèle sont aussi présentés. Dans les travaux de thèse, un modèle dynamique pour le

¹TORCS: The Open Racing Car Simulator

comportement longitudinal et cinématique pour le comportement latéral sont choisis. Ce choix est une première étape vers une situation dans laquelle un modèle plus complet sera pris pour le comportement latéral en prenant le modèle cinématique étendu pour tenir compte des glissements, ce qui peut permettre d'utiliser les convois dans des environnements plus variés.

Les contributions dans ce chapitre sont les suivantes :

- les choix de modèles de véhicules,
- La linéarisation et découplage des deux dynamiques [2],
- La proposition d'un modèle longitudinal pour le convoi [6]. Ce modèle sépare la dynamique du convoi de la dynamique du véhicule, ce qui permet d'obtenir un convoi stable avec de faibles distances entre véhicules, sans nécessiter de communication lourde, comme il va montré dans les chapitres suivants. Ce modèle a été généralisé pour les milieux urbains en prenant des forces proportionnelles aux paramètres curvilignes [2, 5],
- La proposition d'un modèle pour le trafic. Ce modèle peut séparer les dynamiques (lentes) du trafic de la dynamique rapide des véhicules, ce qui peut aussi augmenter la capacité du trafic.

La principale limitation dans les modèles choisis pour le véhicule est l'absence de prise en compte des glissements.

Dans les chapitres suivants, deux modèles du véhicule seront utilisés. Le premier modèle est constitué du modèle dynamique longitudinal donné par l'équation (2.27) et du modèle cinématique latéral donné par l'équation (2.9), (prenant en compte le modèle du système de direction donné dans (2.6)). Ces modèles ont été découplés et linéarisés dans la sous-section (2.2.7.3) ce qui donne deux sous-systèmes linéaires donnés par (2.55).

Le deuxième modèle consiste en deux sous-modèles découplés. Le même modèle latéral et un modèle pour le comportement longitudinal donné par (2.61) sont utilisés. Chaque partie est linéarisée séparément (en supposant qu'elles sont découplées) dans les sous-sections (2.2.7.2) et (2.2.7.4), et des modèles linéaires (2.49) et (2.63) sont obtenus.

Chapitre 3

La commande du convoi

La commande du convoi consiste en deux commandes, la commande longitudinale et la commande latérale. La commande longitudinale assure le suivi du leader en gardant une distance désirée entre les véhicules. Les buts principaux de la commande longitudinale sont de permettre de faibles inter-distances tout en assurant la stabilité (les distances entre véhicules doivent rester toujours bornées) et la sécurité du convoi. Le rôle premier de la commande latérale est de faire suivre aux véhicules le chemin du leader en maintenant les erreurs bornées. Dans le chapitre précédent, des modèles pour le véhicule et le convoi sont proposés. Ces modèles sont très importants pour calculer les lois de commande en prenant en compte la stabilité et la sécurité, et donc pour obtenir la réponse désirée du système. Dans les deux modèles de véhicules, les dynamiques longitudinale et latérale sont totalement découplées, donc les deux lois de commande sont calculées séparément.

Dans ce chapitre, les commandes latérale et longitudinale du convoi sont abordées en milieu urbain et sur l'autoroute.

Un changement sur la loi de commande classique TCI a été proposée. La TCI est une loi de commande qui utilise la stratégie de distance proportionnelle à la vitesse, avec un coefficient de proportionnalité constant. La nouvelle loi de commande rend la distance entre véhicules proportionnelle à la *vitesse relative du véhicule* au lieu d'être proportionnelle simplement à la vitesse. Ce changement a largement réduit les distances inter-véhicules, sans aucun effet négatif sur la stabilité. Au contraire, il permet d'améliorer la stabilité, d'éviter la saturation du couple de commande et d'augmenter la robustesse de la loi de commande sans grand effet sur les distances inter-véhicules. La nouvelle loi est un mélange de commande décentralisée locale et de commande globale.

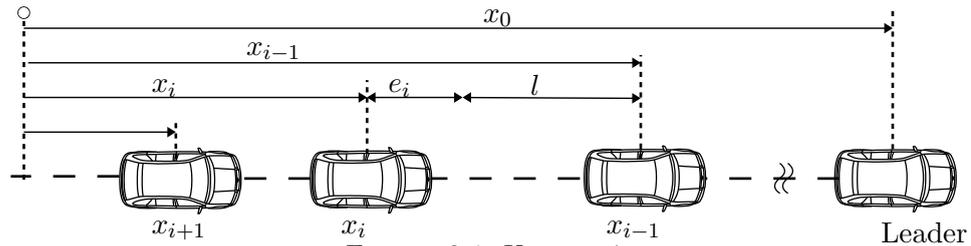


FIGURE 3.1: Un convoi

Cette loi est étudiée pour deux modèles longitudinaux linéaires. Le premier modèle est un double intégrateur qui représente le modèle linéarisé de la dynamique longitudinale après découplage de la dynamique latérale. Le deuxième modèle est un triple intégrateur qui représente le modèle linéarisé de la dynamique longitudinale, en supposant qu'il n'est pas couplé avec la dynamique latérale et en prenant en compte le modèle du moteur.

La stabilité et la robustesse de cette loi de commande longitudinale pour le convoi est vérifiée. Les conditions de stabilité sont trouvées. Une comparaison avec les lois précédentes est donnée.

Pour le comportement latéral, le modèle linéarisé de la dynamique latérale est utilisé. Une commande par modes glissants est développée afin d'assurer la stabilité.

La simulation est faite sous Matlab et TORCS pour les convois urbains et les convois sur autoroute. Les résultats montrent l'efficacité de la nouvelle proposition.

3.0.4 Définitions

3.0.4.1 Commande longitudinale

L'objectif principal de la commande longitudinale est de garder la distance (cartésienne/curviligne) entre véhicules égale à l (figure 3.1), et d'imposer à tous les véhicules la même vitesse.

3.0.4.2 Commande latérale

L'objectif principal de la commande latérale est de faire suivre au véhicule la trajectoire souhaitée, en imposant que d_i et θ_{pi} convergent vers 0 (figure 3.2).

3.0.5 Les objectifs de la commande du convoi

Les objectifs principaux de la commande et leurs traitements dans les travaux de thèse sont :

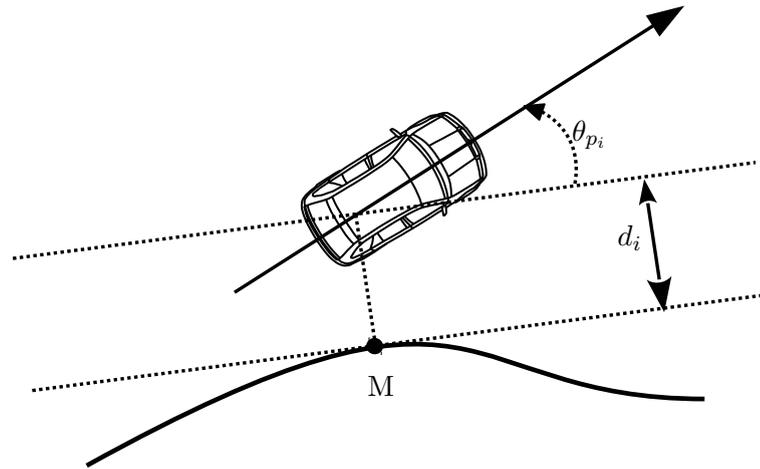


FIGURE 3.2: Commande latérale

1. Garder la distance entre véhicules égale à l , et faire en sorte que tous les véhicules aient la même vitesse [2, 5–9, 82–84],
2. Faire suivre la trajectoire souhaitée à chaque véhicule [2, 5],
3. Assurer la stabilité du convoi (les erreurs ne doivent pas croître quand elles se propagent le long du convoi) [2, 5–9, 82–84],
4. Assurer la sécurité du convoi [5, 6, 8, 9, 84],
5. Augmenter la densité du trafic (diminuer les distances inter-véhicules) [2, 5–9, 82–84],
6. Garantir la stabilité même en cas de perte totale de la communication entre véhicules [8],
7. Garantir la stabilité et la sécurité en présence de retards d'actionnement, de capteurs et de communication [5, 9, 84],
8. Étudier les convois homogènes et non-homogènes [9],
9. Commander des convois sur autoroute [6–9, 82–84], en milieu urbain [2, 5], et sur tous types de terrains.

3.1 L'état de l'art

3.1.1 La commande de robots mobiles en formation

La commande de robots mobiles en formation est la commande d'un groupe de véhicules autonomes qui sont tenus de suivre une trajectoire (ou un chemin) prédéfinie tout en maintenant une structure spatiale souhaitée. Le déplacement en formation présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes classiques, par exemple, il peut réduire le coût du système, augmenter sa robustesse et son efficacité tout en offrant une redondance, la capacité de reconfiguration et de flexibilité de la structure.

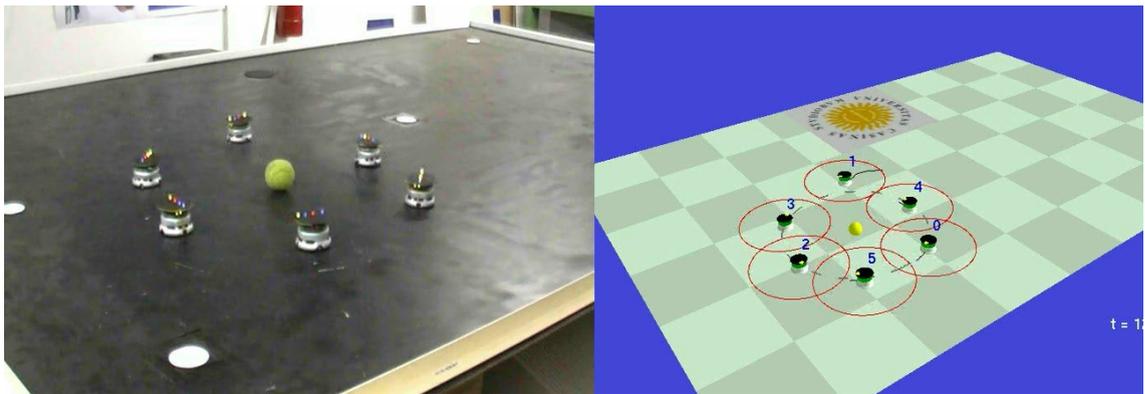


FIGURE 3.3: Commande de robot mobile en formation (Robotics Research Group of the DIEI University of Cassino and Southern Lazio)

La commande en formation a de nombreuses applications, comme les patrouilles de sécurité, la recherche et le sauvetage dans des environnements dangereux. Dans les missions militaires, un groupe de véhicules autonomes est nécessaire pour maintenir une formation spécifiée pour la couverture de zone et la reconnaissance. Dans un petit groupe de satellites, la formation contribue à réduire la consommation de carburant pour la propulsion et à élargir leurs capacités de détection. Dans un système automatisé pour la circulation autoroutière (AHS), la capacité du réseau de transport peut être considérablement augmentée si les véhicules peuvent rouler en convoi à une vitesse souhaitée tout en gardant une certaine distance entre les véhicules [85]. La recherche sur la commande en formation aide également à mieux comprendre certains comportements sociaux biologiques, tels que les essaims d'insectes et les nuées d'oiseaux.

Dans la commande en formation, différentes topologies de commande peuvent être adoptées selon les scénarios. Il peut exister un ou plusieurs leaders dans le groupe, tandis que les autres robots suivent l'un des leaders. Chaque robot possède à bord un système de capteurs et une unité de calcul. Dans certains scénarios d'application, les robots peuvent avoir une capacité de communication limitée. Mais d'une manière générale,

les robots n'ont pas à leur disposition toute l'information concernant l'ensemble de la formation.

Beaucoup de questions doivent être considérées lors de la conception d'un contrôleur distribué pour une formation de robots mobiles, telles que la stabilité de la formation, la commandabilité de différents modèles de formation, la sécurité et les incertitudes dans les formations (la robustesse de la commande). De nombreuses approches de commande ont été mises en avant pour résoudre les problèmes de la commande de formations, comme la stratégie leader-suiveur, l'approche de structure virtuelle [86, 87] et la méthode basée sur le comportement [88]. Dans l'approche leader-suiveur, quelques agents sont désignés comme des leaders, tandis que d'autres sont désignés en tant que disciples. Les leaders suivent des trajectoires prédéfinies, et les suiveurs suivent leurs voisins les plus proches selon des schémas donnés. Dans l'approche comportementale, l'action de commande pour chacun des agents est définie par une moyenne des commandes pondérées correspondant à chaque comportement souhaité pour l'agent. Dans la structure virtuelle, la formation entière est traitée comme un corps rigide unique. La structure virtuelle peut évoluer dans son ensemble dans une direction donnée avec une orientation donnée et maintenir une relation géométrique rigide entre plusieurs agents.

3.1.2 Navigation en convoi

La formation de convois est une approche prometteuse pour améliorer la sécurité, l'utilisation des routes, économiser le carburant et diminuer les émissions. Le but de la commande longitudinale est de s'assurer que tous les véhicules se déplacent dans la même voie à la même vitesse avec les distances inter-véhicules souhaitées. La commande de convoi règle la distribution spatiale des véhicules de telle sorte que l'utilisation de la route soit maximisée tandis que les risques de collision sont réduits ou évités.

La commande de convois diffère selon qu'il s'agit de circulation autoroutière [20–22] ou urbaine [18, 60, 89]. En effet, sur autoroute, les vitesses sont plus élevées, les rayons de courbure plus grands et le nombre d'obstacles plus faible qu'en zone urbaine. Donc, dans les applications sur route la concentration est sur la commande longitudinale, tandis que dans le cas des milieux urbains l'attention est portée sur les deux commandes (longitudinale et latérale) et les couplages entre elles.

La communication est très importante pour garder la stabilité et pour réduire la distance entre les véhicules, mais peut être source d'instabilité en cas de perte totale ou partielle de la communication [90, 91].

En France, plusieurs projets de recherche ont porté sur la commande de convois.

À Clermont-Ferrand au sein du laboratoire LASMEA ¹, les travaux de Bom [60] ont été effectués dans le cadre du projet MobiVIP. Bom [60] a développé une stratégie de commande globale pour la mise en œuvre d'un convoi autonome de véhicules urbains électriques. Il a utilisé le modèle cinématique de "bicyclette" pour le véhicule, puis il a utilisé la technique de la linéarisation exacte pour découpler les commandes latérale et longitudinale. La nouvelle stratégie a été validée par des expérimentations avec des véhicules réels, mais l'utilisation de capteurs GPS RTK a rendu le système très cher pour des applications urbaines.

Les travaux de Bom sont suivis par les travaux de Avanzini dans le cadre du projet CityVIP. Avanzini [92] a contribué au développement de nouvelles fonctionnalités et de modes de navigation pour les convois de véhicules. Il a mis en œuvre les travaux de Bom et il a remplacé le GPS RTK par la vision monoculaire. Ses contributions sont : 1- la représentation de la trajectoire, basée sur des courbes BSplines uniformes, et les stratégies pour changer ces trajectoires en temps réel. 2- l'adaptation et la mise en œuvre des lois de commande à une nouvelle représentation de l'environnement.

D'autres recherches sont faites au sein du laboratoire LAGIS ² à Lille [14, 93, 94]. [14] a proposé une stratégie de commande globale pour le convoi. Il a proposé une stratégie de commande longitudinale d'espacement de sécurité, qui est une fonction non-linéaire de la vitesse du véhicule. Cette stratégie utilise des informations de l'état du véhicule et la capacité de freinage pour ajuster la position et la vitesse du véhicule commandé. Pour la commande latérale, la commande floue a été utilisée.

Le cadre général des travaux de [93, 94] est la surveillance d'un train de véhicules, pour disposer d'un convoi de véhicules sûr avec une capacité de réagir à une défaillance d'un des véhicules.

Des recherches importantes sont aussi menées au sein de l'UTBM ³. Dans [72, 95] le problème a été étudié en utilisant le principe d'agent réactif. Chaque véhicule du convoi est considéré comme un agent réactif qui peut percevoir son environnement et réagir en préservant une distance désirée avec le véhicule précédent. Alors, la conduite en convoi est le résultat des interactions directes entre chaque véhicule et son prédécesseur. Un modèle a été proposé pour le mouvement latéral [72]. Cette proposition améliore la réponse de la commande latérale. [95] avait pour cadre le projet SafePlatoon. L'approche proposée est valable pour plusieurs types de configurations.

À Loriane, dans le cadre du projet InTraDE ⁴, des recherches sont faites sur la commande de convoi [96]. Yazbeck [96] s'est concentré sur la commande latérale du convoi. Deux

¹Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l' Electronique et d'Automatique

² Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal

³Université de technologie de Belfort-Montbéliard

⁴Intelligent Transportation for Dynamic Environment

approches locales basées sur la mémorisation du chemin du précédent sont proposées. La première approche, est basée sur une loi de commande analytique mais ne donne pas la stabilité. La deuxième approche proposée, est la NOC (Non Oscillatory Convergence). C'est une approche discrète obtenue à partir d'une approche heuristique combinée à une approche géométrique. NOC est une approche stable. La validation de cette approche a été vérifiée par simulation et expérimentation, qui ont montré la bonne performance de la commande.

L'équipe de IMARA ⁵ fait des recherches sur le stationnement d'un convoi de véhicules automatisés [97] et sur la faisabilité de la communication e vis-à-vis entre les véhicules [98] et son amélioration [99].

3.1.3 Les stratégies de commande longitudinale du convoi

Les stratégies de navigation de convoi peuvent être distinguées selon la topologie de communication;jj :

3.1.3.1 Commande selon la communication entre les véhicules et sa topologie

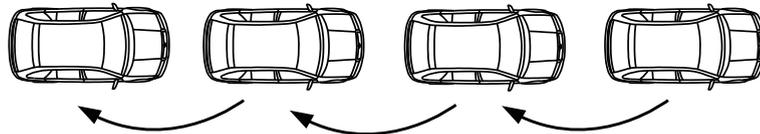


FIGURE 3.4: Schéma de contrôle Local

La commande peut être globale [60, 89, 100] ou locale [77, 101], selon les communications inter-véhicules. Une commande locale repose sur des données provenant des véhicules adjacents, figure (3.4), tandis que la commande globale utilise des données en provenance, au minimum, du leader (figure 3.5). En commande locale, chaque véhicule est totalement autonome et ne nécessite pas de capteurs sophistiqués [77, 102]. Elle peut être utilisée dans tous les environnements, mais les performances de suivi de trajectoire et de respect de l'inter-distance ne sont pas très bonnes. La commande globale au contraire est plus précise, mais elle requiert des capteurs plus sophistiqués, et parfois des adaptations d'infrastructure. Enfin, elle nécessite des systèmes de communication très fiables.

De plus, la commande globale peut être centralisée ou décentralisée [79, 103]. Dans le contrôle centralisé, les véhicules obtiennent leur commande à partir d'unités centrales (le leader dans la figure 3.6). Ils ne sont donc pas autonomes et la communication est fondamentale : toute perte ou retard de communication est critique. Alors que dans un

⁵Informatique, Mathématiques et Automatique pour la Route Automatisée

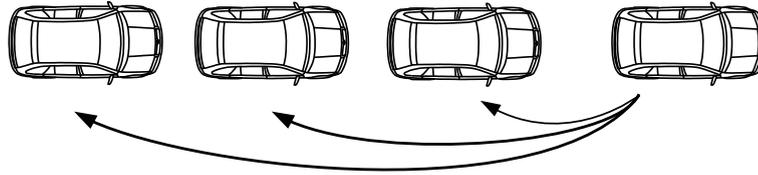


FIGURE 3.5: Schéma de contrôle Global

contrôle décentralisé (figure 3.7), chaque véhicule reçoit des données provenant d'autres véhicules, mais calcule sa propre commande de manière autonome, de sorte que la communication demeure très importante, mais que sa perte n'est pas aussi critique que dans le cas centralisé.

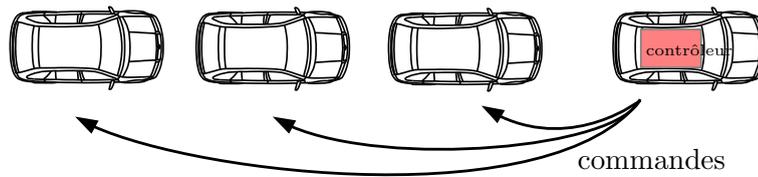


FIGURE 3.6: Schéma de contrôle centralisé

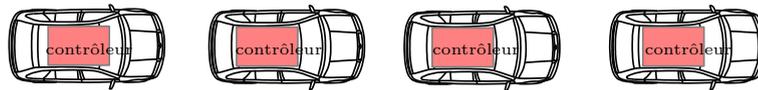


FIGURE 3.7: Schéma de contrôle décentralisé

3.1.3.2 Commande selon la consigne de régulation des distances inter-véhicules

Les distances désirées inter-véhicules diffèrent selon la stratégie de commande. La distance désirée entre les véhicules peut être constante [20, 73, 104] (figure 3.8), ou variable (figure 3.9). Dans la commande avec une distance variable, la distance peut être une fonction de la vitesse du véhicule [105, 106], de sa dynamique ou des conditions routières [107]. L'espacement variable ne nécessite pas beaucoup des données provenant d'autres véhicules, la stabilité du convoi peut être assurée en utilisant simplement des informations obtenues avec des capteurs embarqués [102]. Mais les distances entre les véhicules demeurent grandes, et par conséquent la densité du trafic n'est pas élevée. L'espacement constant permet quant à lui, au prix de communications entre les véhicules, d'assurer la stabilité du convoi avec une densité de trafic très élevée.

Bien que l'espacement variable se traduise par de grandes inter-distances, les avantages qu'il présente par ailleurs ont poussé des chercheurs à tenter de réduire l'espacement pour rendre cette commande plus attractive. La commande qui garde une distance entre les véhicules proportionnelle à la vitesse du véhicule est considérée comme une référence dans la stratégie d'espacement variable.

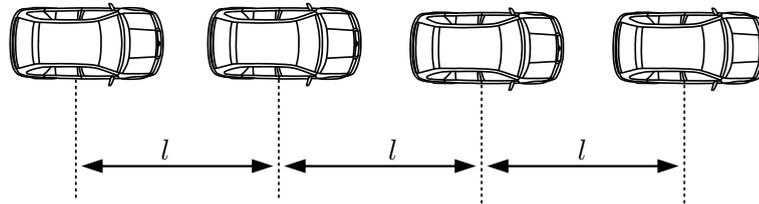


FIGURE 3.8: L'approche avec distance fixe

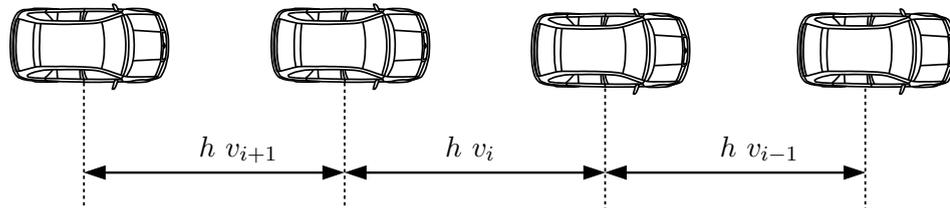


FIGURE 3.9: L'approche avec distance variable

Dans la stratégie d'inter-distance proportionnelle à la vitesse, plusieurs manières de définir le coefficient de proportionnalité (souvent noté h) peuvent être trouvées. Il peut être constant, comme dans la TCI (Temps Constant Inter-véhicule, pour l'anglais CTH Constant Time Headway) qui est la méthode la plus simple et la plus courante parmi les stratégies de distances variables [32, 65, 106, 108], tandis que d'autres utilisent un coefficient de proportionnalité variable, qui peut varier linéairement avec la vitesse ou la vitesse relative [101], ou avec la dynamique du véhicule et les conditions routières [107].

Dans [65], il est prouvé que la stabilité du convoi diminue lorsque le coefficient de proportionnalité h diminue. Par ailleurs, [109] montre que les couples de commande sont inversement proportionnels à h . Cela peut conduire à des saturations de couple en cas de choix d'un coefficient faible. Il a été conclu que, pour commander un convoi avec une faible inter-distance, il convient d'utiliser la stratégie de distance constante et d'avoir une communication entre les véhicules. À notre connaissance, toutes les recherches antérieures se sont concentrées sur l'optimisation du coefficient de proportionnalité h pour un bon compromis entre la stabilité et la distance inter-véhicules.

Les deux approches précédentes (espacement constant et espacement variable) peuvent être combinées pour élaborer une approche qui garantit la robustesse et la sécurité (figure 3.10).

3.1.4 La commande de véhicules et les modèles utilisés

Le choix du modèle du véhicule dépend de la dynamique du système, de la trajectoire, des vitesses et de la précision requise... Une loi de commande plus sophistiquée peut

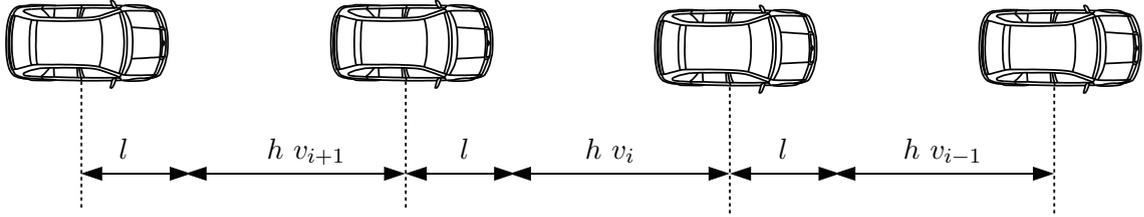


FIGURE 3.10: L'approche avec distance hybride

améliorer la réponse du système mais rend l'étude plus complexe et peut aussi nécessiter des capteurs très chers.

3.1.4.1 Utilisation du modèle cinématique du véhicule.

Ce modèle peut être utilisé pour la commande des véhicules légers et lents, dans les cas définis ci dessous :

Hypothèse 1 : La vitesse désirée est parfaitement suivie :

Au début, l'effort de recherche a été concentré uniquement sur le modèle cinématique, en supposant que la vitesse désirée est parfaitement suivie [110–112]. Ainsi, les contrôleurs négligent la dynamique du véhicule (voir figure 3.11) et ne tiennent compte que du système de direction. Ceci limite l'utilisation des modèles cinématiques à la commande des véhicules légers et lents.

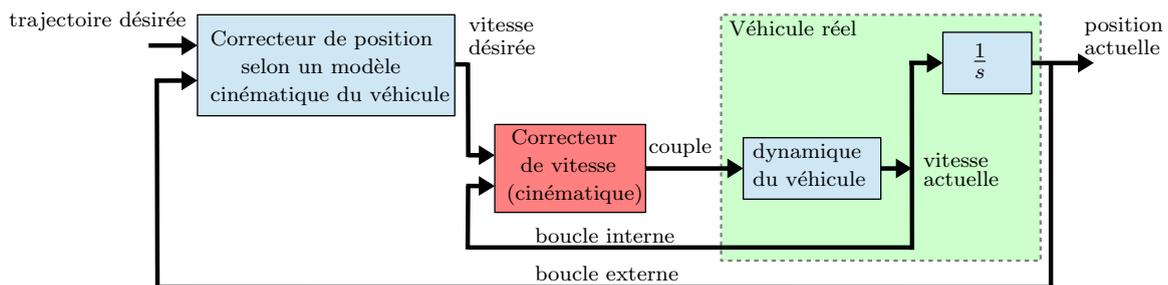


FIGURE 3.11: Commande selon le modèle cinématique

Une amélioration du modèle cinématique est proposée en considérant que les glissements sont des perturbations [113], ce qui peut étendre le domaine d'utilisation du modèle cinématique. En principe, ce modèle peut être utilisé pour des véhicules lourds (camions) qui roulent à faible vitesse. Il peut prendre en compte les glissements générés à cause du poids du véhicule. Mais ces modèles s'avèrent peu pratiques et ils peuvent produire des oscillations, même pour faibles vitesses [56].

Hypothèse 2 : La vitesse désirée n'est pas parfaitement suivie

Dans ce cas, la vitesse désirée n'est pas supposée parfaitement suivie, mais il faut s'efforcer de satisfaire cette contrainte. Pour cela, un modèle dynamique pour la commande de la vitesse (figure 3.12) est utilisé afin d'obtenir une commande précise de la vitesse (perfect velocity tracking). Plusieurs travaux ont utilisé le modèle dynamique ou ont essayé d'assurer le "perfect velocity tracking".

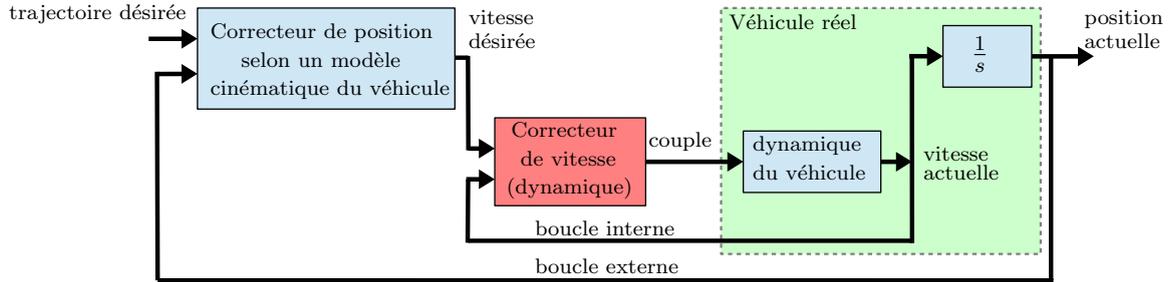


FIGURE 3.12: Commande utilisant un modèle cinématique pour le véhicule et un modèle dynamique pour la vitesse

La première approche est d'utiliser un modèle dynamique du véhicule et une commande analytique classique pour la vitesse. Ce modèle peut être complexe et les paramètres peuvent changer dans le temps, ce qui nécessite d'utiliser de capteurs chers et peut rendre la commande complexe. La commande peut s'avérer imprécise à cause de la mauvaise connaissance des paramètres du modèle. Il est possible d'utiliser une commande adaptative qui peut être plus robuste aux incertitudes sur les paramètres. La commande adaptative est une commande robuste même sans connaître exactement les valeurs des paramètres dynamiques. Dans [114], cette technique est utilisée, mais sans prendre en compte les glissements. De bons résultats en simulation sont obtenus pour un robot mobile avec une vitesse linéaire et une vitesse de rotation maximales de 10 m/s et 5 rad/s respectivement. La simulation intègre des changements de masse du véhicule, et la robustesse de la commande permet au véhicule de suivre la trajectoire précisément.

Cependant, l'utilisation d'un modèle cinématique pour le véhicule sans prendre en compte les glissements réduit la plage des vitesses de travail de cette commande.

D'autres travaux concernent l'utilisation de réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette technique donne un contrôleur robuste et adaptatif sans qu'il soit nécessaire de connaître le modèle dynamique exact [115, 116].

Dans [115], deux niveaux de commande sont utilisés. Tout d'abord, un contrôleur cinématique, en utilisant un RNA, fournit la vitesse souhaitée, nécessaire pour réduire au minimum l'erreur de position. Ensuite, un contrôleur adaptatif dynamique transforme la vitesse souhaitée en couples de roues, de telle sorte que la vitesse du robot converge vers la vitesse

souhaitée. Aucune connaissance du modèle dynamique n'est nécessaire, et un comportement adaptatif peut être obtenu par apprentissage préalable. Les expérimentations ont été faites par simulation uniquement à faibles vitesses (0.5 m/s). La comparaison avec la commande classique montre l'efficacité de cette commande. Cependant, à l'exception des réseaux de neurones stochastiques aucune preuve de stabilité n'a été établie.

3.1.4.2 Utilisation d'un modèle dynamique du véhicule

Le modèle dynamique est plus représentatif du système car il prend en compte les forces et les couples appliqués sur le système. Cependant, il est plus difficile à utiliser car les paramètres dynamiques peuvent changer pendant la mission et ils peuvent être très difficiles à estimer directement en ligne.

Pour un véhicule roulant à une vitesse modérée sans glissement sur un terrain dur, les paramètres peuvent être considérés comme stables. Dans [117], les auteurs présentent la commande dynamique pour un robot mobile en supposant un modèle dynamique (sans prise en compte des glissements) avec des paramètres stables. La satisfaction de ces contraintes (paramètres constants, pas de glissement) réduit la vitesse maximale admissible.

Les incertitudes sur les paramètres dynamiques et la difficulté de les mesurer ou de les estimer exige l'utilisation d'une commande adaptative qui ne nécessite pas la connaissance exacte des paramètres et qui peut s'adapter aux changements de ces paramètres [118]. Cette commande donne une réponse de haute précision assurée dans des conditions différentes d'adhérence et d'interaction avec le sol. Mais cette commande est valable pour des vitesses inférieures à 10 km/h . Des oscillations peuvent apparaître et la précision diminue si la vitesse est supérieure à 10 km/h . Dans [118] l'efficacité de cette commande par simulation pour une vitesse maximale de 2 m/s en présence de faibles glissements est vérifiée, avec de bien meilleurs résultats qu'avec la commande classique non adaptative.

Dans toutes les commandes précédentes, les glissements ne sont pas pris en compte dans les modèles dynamiques, ce qui réduit la plage des vitesses admissibles. Le modèle dynamique qui prend en compte les glissements est plus complexe et il exige la connaissance des angles de glissement pour obtenir la réponse désirée. Les angles de glissement peuvent être estimés à l'aide de plusieurs méthodes. L'une de ces méthodes est l'utilisation d'un observateur de type filtre de Kalman pour estimer les variables d'état du système et les paramètres de glissement. Cette technique a été utilisée dans [119, 120] avec une centrale inertielle et un GPS. Des expérimentations ont été faites en utilisant des véhicules réels et des résultats satisfaisants ont été obtenus, car les angles de glissement ont été pris

en compte. Mais les capteurs utilisés (GPS, centrale inertielle...) sont très onéreux et rendent cette solution peu viable pour les applications automobiles.

3.1.4.3 Utilisation d'un modèle cinématique étendu

La simplicité du modèle cinématique et la possibilité de le linéariser facilement a poussé les chercheurs à faire des modifications pour prendre en compte les glissements en gardant la simplicité du modèle cinématique. Une extension du modèle cinématique a été faite en prenant en compte les angles de glissement. Dans le nouveau modèle, les angles ont été considérés comme des angles de direction pour les roues arrière et avant, comme cela a été présenté à la section (2.2.6.3). La mesure directe des angles de glissement semblait être difficilement réalisable à un coût raisonnable. Alors, il était nécessaire d'estimer ces angles. Cette estimation a été faite en utilisant plusieurs approches.

L'approche la plus simple est d'utiliser un observateur de la différence (figure 3.13). Cette approche utilise l'idée que la différence entre la position actuelle et la position selon le modèle, qui a été calculée sans prise en compte des glissements, est due seulement au glissement. Il est donc possible d'obtenir une estimation des angles de glissement à partir de la mesure de cette erreur. Dans [42] les auteurs ont utilisé un GPS-RTK, très précis mais très cher, pour mesurer la position réelle et la différence entre la position mesurée et la position calculée est faite selon un modèle qui ne prend pas en compte les angles de glissement. Un modèle cinématique étendu (2.10) a été utilisé pour la conception d'une loi de commande. Cette technique a l'avantage de prendre en considération d'autres phénomènes (inertie, retards, erreurs de calibration ...) mais peut produire beaucoup de bruit dans l'estimation car plusieurs phénomènes sont pris dans le modèle. L'efficacité d'un tel contrôle est satisfaisante lorsque les paramètres de glissement varient lentement, mais ce modèle est limité par les retards inévitables de l'actionneur d'angle de direction et l'inertie du véhicule, qui peuvent être la cause de dépassements de la trajectoire. Afin d'éviter ces dépassements, une commande prédictive a été intégrée dans la loi de commande proposée. Des expérimentations ont été faites en utilisant un tracteur, dans des conditions réelles de travail mettant en évidence les avantages des lois de commande proposées. Les résultats présentés montrent que la précision de suivi peut être conservée quel que soit le terrain à suivre et quelles que soient les propriétés d'adhérence de la terre. L'algorithme global maintient presque toujours l'erreur de suivi dans d'une plage acceptable de ± 15 cm à une vitesse maximale de 8 km/h.

Une autre technique pour estimer les paramètres de glissement est la dualité entre la commande et l'observation. Le modèle retenu pour construire l'observateur est très important, car l'utilisation d'un modèle simple peut produire des erreurs dans l'estimation.

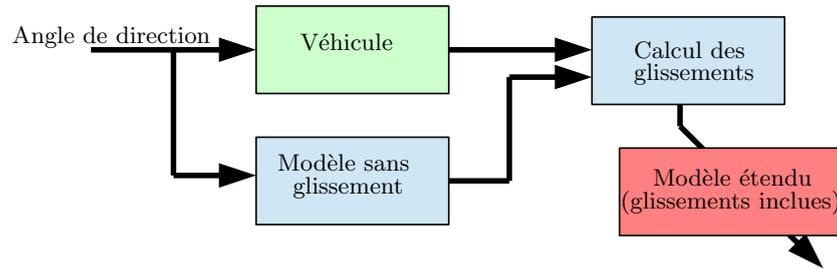


FIGURE 3.13: L'observateur de la différence

Dans [121], il est construit un observateur utilisant un modèle cinématique étendu (voir figure 3.14). Les angles de glissement obtenus sont utilisés dans une loi de commande prédictive (pour compenser les erreurs produites par le retard des actionneurs) et adaptative (pour compenser les erreurs produites par l'incertitude des valeurs des paramètres et les variables estimées). La performance est très satisfaisante pour des vitesses inférieures à 8 *km/h* avec une erreur inférieure à 10 *cm*, ce qui est une précision tout à fait acceptable pour les applications agricoles. Cependant, l'utilisation du modèle cinématique étendu pour estimer les angles de glissement (changeant rapidement aux hautes vitesses), peut produire des retards dans les valeurs estimées pouvant conduire à des oscillations du véhicule.

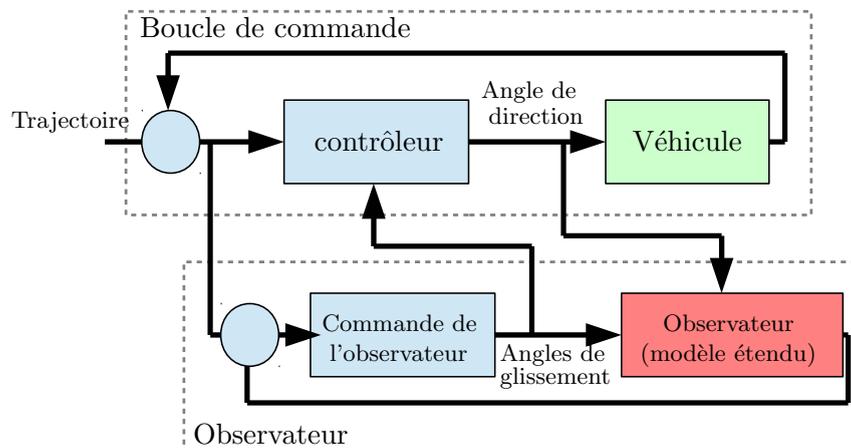


FIGURE 3.14: Observateur en utilisant un modèle cinématique étendu

Généralement, les observateurs basés sur des modèles cinématiques pour estimer les variables dynamiques souffrent d'un retard dans les valeurs estimées, qui peuvent engendrer des oscillations du système. D'un autre côté, l'utilisation d'un modèle dynamique peut être très complexe et il contient des paramètres qui doivent être mesurés en ligne (l'adhérence du sol...). La mesure directe de ces variables coûte très cher, donc un observateur peut être conçu pour les estimer. En observant que l'adhérence du sol change plus lentement que les angles de glissement, il est possible d'utiliser le modèle cinématique étendu pour estimer ces variables lentes au lieu de les mesurer. Un observateur hybride (figure 3.15) a été utilisé dans [4, 56, 122], qui consiste en deux étapes : la

première étape est l'étape d'estimation des variables qui évoluent lentement, en utilisant le modèle cinématique étendu, tandis que la deuxième étape utilise les paramètres estimés à la première dans le modèle dynamique pour estimer les variables qui évoluent plus rapidement (angles de glissement). Cette amélioration est importante à haute vitesse, car tout retard dans l'estimation des angles de glissement mène à un comportement oscillatoire. L'efficacité de cette approche a été vérifiée par simulation avancée en utilisant Adams en co-simulation avec Matlab avec une vitesse maximale de 28 km/h . De plus, des expérimentations réelles ont été effectuées en utilisant un véhicule tout-terrain avec une vitesse maximale de 18 km/h . Dans [4, 122] une singularité de l'inversion d'une matrice se produit, et l'observateur dans ce cas ne peut pas donner des estimations. Ce problème a été résolu dans [56] en utilisant une nouvelle approche pour estimer les facteurs d'adhérence.

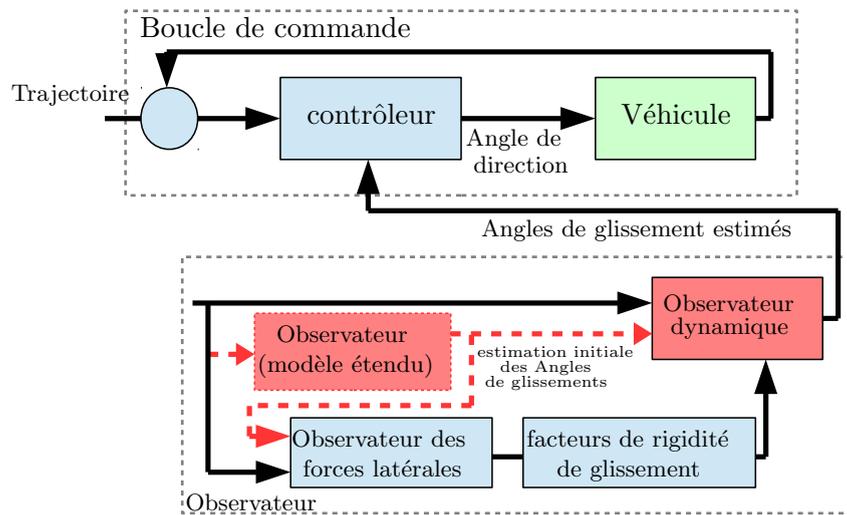


FIGURE 3.15: L'observateur hybride

3.1.4.4 Utilisation d'un modèle dynamique-cinématique

Un modèle dynamique non linéaire a été proposé, qui combine explicitement les contraintes cinématiques et dynamiques [50]. Les angles de glissement ont été pris en compte mais en supposant qu'ils sont petits. Une commande adaptative est utilisée pour suivre le chemin et pour compenser les incertitudes de glissement latéral. Des résultats ont été obtenus par simulation avec une vitesse maximale de 10 km/h . Ils ont montré l'efficacité de la méthode proposée. Mais les contraintes sur les angles de glissement et l'utilisation des contraintes cinématiques réduit l'efficacité de cette approche à haute vitesse.

Dans [46], un modèle hybride a été utilisé. Celui-ci a supposé que la dynamique latérale est découplée de la dynamique longitudinale. Un modèle dynamique est retenu pour le comportement longitudinal et un modèle hybride est retenu pour le comportement

latéral (cinématique aux faibles vitesses, dynamique à haute vitesse). Cette approche a donné de bons résultats et a été utilisée pour la commande des véhicules dans un convoi. Des expérimentations réelles ont été effectuées avec des vitesses de $0 - 30 \text{ km/h}$. Cette vitesse maximale peut être dépassée si les rigidités de glissement sont estimées.

3.1.4.5 Utilisation d'un modèle retenu dans le cadre de la thèse

Dans cette thèse, les deux modèles utilisés sont des modèles mixtes (dynamique-cinématique). Le premier modèle (2.53) prend en compte les effets mutuels entre les deux dynamiques (longitudinale et latérale). Ces modèles sont découplés et deux sous-système linéaires et découplés sont obtenus (2.55). Ceci permet d'utiliser les techniques de lois de commande linéaires et de calculer la commande de chaque système indépendamment de l'autre, comme illustré figure 3.16. Le deuxième modèle consiste en deux sous-systèmes découplés (2.61) et (2.46). Il est donc également possible de calculer les deux commandes séparément.

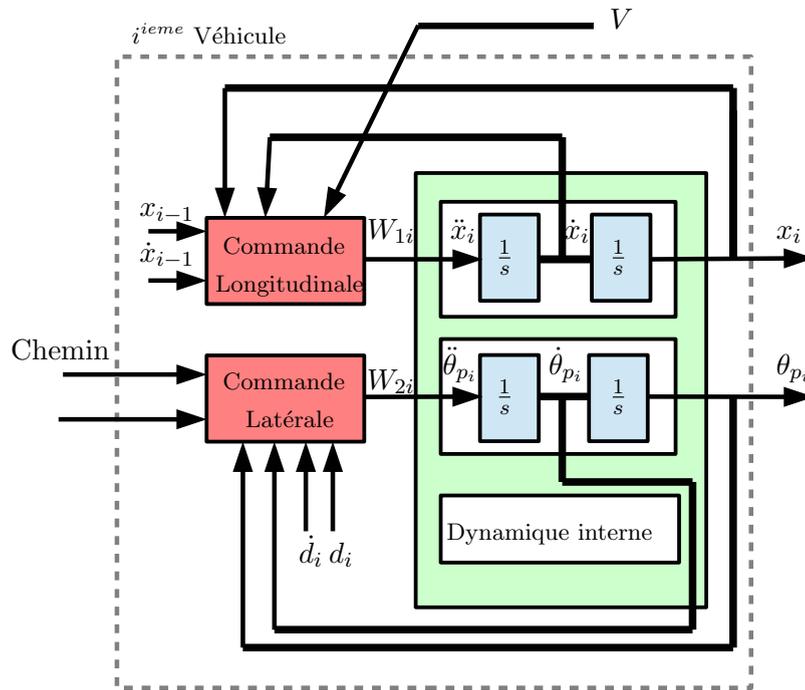


FIGURE 3.16: Commande de véhicule en utilisant le premier modèle

3.2 Notions de stabilité et de sécurité du convoi

3.2.1 Définitions

Dans un convoi plusieurs stabilités peuvent être définies [31, 65, 107] :

3.2.1.1 La stabilité individuelle de chaque véhicule

Les erreurs d'espacement doivent tendre vers zéro si le véhicule précédent roule à une vitesse constante. c'est à dire :

$$\ddot{x}_{i-1} \rightarrow 0 \Rightarrow e_i \rightarrow 0 \quad (3.1)$$

En cas d'accélération ou décélération du véhicule précédent, les erreurs d'espacement ne seront pas nulles.

3.2.1.2 La stabilité du convoi

La stabilité du convoi est la propriété selon laquelle les erreurs d'espacement (où l'erreur latérale) ne s'amplifient pas [31, 90] ou restent bornées [65] quand elles se propagent le long du convoi. Il est important de décrire comment l'erreur d'espacement (où l'erreur latérale) se propage d'un véhicule à l'autre dans le convoi.

3.2.1.3 Stabilité longitudinale du convoi

La définition la plus générale de la stabilité longitudinale du convoi a été donnée par Swaroop [65]. Dans cette définition, le convoi est considéré comme stable si les erreurs d'espacement inter-véhicules sont bornées quand les erreurs d'espacements initiales de tous les véhicules sont bornées.

Selon [65] le convoi est stable si $\forall \gamma > 0, \exists \delta > 0$ tel que :

$$\max \left(\|e_i(0)\|_\infty, \|\dot{e}_i(0)\|_\infty, \|S(0)\|_\infty, \left\| \dot{S}(0) \right\|_\infty \right) < \delta \Rightarrow \sup_i \|e_i(t)\|_\infty < \gamma \quad (3.2)$$

où $S_i(t) = \sum_{j=1}^i e_j(t)$.

Il a aussi donné une définition de stabilité faible : le convoi est faiblement stable si $\forall \gamma > 0, \exists \delta > 0$ tel :

$$\max (\|e_i(0)\|_\infty, \|\dot{e}_i(0)\|_\infty) < \delta \Rightarrow \sup_i \|e_i(t)\|_\infty < \gamma \quad (3.3)$$

1 - Les conditions de stabilité du convoi homogène

Une définition plus stricte considère que le convoi est stable si les erreurs d'espace ne croissent pas quand elles se propagent le long du convoi [31, 90]. Selon Sheikholeslam, cette contrainte peut être satisfaite si la fonction de transfert d'erreur $H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)}$ satisfait les suivants :

- $H_i(s), H_0(s)$ sont des fonctions de transfert propres et stables.
- $H_0(0) = 0$ pour avoir une erreur nulle à l'état stationnaire.
- $\|H_i(s)\|_\infty \leq 1$ pour assurer l'atténuation de l'erreur le long de convoi.
- Il est préférable d'avoir $h_i(t) > 0$, où $h_i(t)$ est la réponse impulsionnelle de $H_i(s)$, pour éviter les oscillations dans le convoi.

Ces conditions sont exprimées dans le domaine fréquentiel. Dans le domaine temporel, cette définition peut être aussi donnée par [123] :

$$\begin{aligned} \|e_i(t)\|_p &\leq \|e_{i-1}(t)\|_p \\ \|\dot{e}_i(t)\|_p &\leq \|\dot{e}_{i-1}(t)\|_p \\ \|\ddot{e}_i(t)\|_p &\leq \|\ddot{e}_{i-1}(t)\|_p \end{aligned} \quad \forall p \in [1, \dots, \infty[, \forall i = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

C'est-à-dire que les erreurs de position, vitesse et accélération ne doivent pas croître le long du convoi.

Selon [123], une condition nécessaire et suffisante pour satisfaire à la définition précédente est d'avoir $\|h_i(t)\|_1 < 1 \quad \forall i = 1, \dots, N$. Mais en pratique cette condition n'est pas nécessaire pour obtenir un convoi stable car il est possible de trouver des convois stables (selon la définition 3.2) sans satisfaire cette condition.

Une condition moins stricte peut être utilisée pour vérifier la stabilité [31, 100] :

$$\|e_i(t)\|_\infty \leq \|e_{i-1}(t)\|_\infty \quad (3.5)$$

Cette condition est une condition suffisante qui peut garantir la stabilité en assurant que l'amplitude maximale ne croît pas le long de convoi. Cette condition peut être assurée si les conditions suffisantes $\|H_i(\omega)\|_\infty \leq 1$ et $h_i(t) > 0$ sont satisfaites.

Dans plusieurs travaux, la condition $\|H_i(\omega)\|_\infty \leq 1$ a été considérée comme une condition suffisante pour la stabilité. En réalité, cette condition est suffisante pour la stabilité du deuxième ordre :

$$\begin{aligned}
\|e_i(t)\|_2 &\leq \|H_i(s)\|_\infty \|e_{i-1}(t)\|_2 \leq \|e_{i-1}(t)\|_2 \\
\|\dot{e}_i(t)\|_2 &\leq \|H_i(s)\|_\infty \|\dot{e}_{i-1}(t)\|_2 \leq \|\dot{e}_{i-1}(t)\|_2 \\
\|\ddot{e}_i(t)\|_2 &\leq \|H_i(s)\|_\infty \|\ddot{e}_{i-1}(t)\|_2 \leq \|\ddot{e}_{i-1}(t)\|_2
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Cette stabilité peut assurer l'atténuation de l'énergie de l'erreur mais ne donne pas une indication sur l'amplitude maximale, ce qui peut être la cause d'accidents.

2 - Les conditions de stabilité du convoi non-homogène

Les conditions données par (3.4, 3.5, 3.6) sont pour les convois homogènes avec des distances égales entre véhicules. Dans le cas le plus général, quand une commande non-homogène avec des distances inter-véhicules non-égales est considérée, une condition pour la stabilité de convoi non-homogène peut être trouvée dans [107, 123, 124] :

$$\|H_1(s) H_2(s) H_3(s) \dots H_k(s)\|_\infty \leq 1 \tag{3.7}$$

Cette condition assure l'atténuation de l'énergie des erreurs $\|e_1(t)\|_2 \leq \|e_k(t)\|_2$, sans une indication sur l'amplitude.

D'autres conditions de stabilité de convois non-homogènes en utilisant la loi TCI peuvent être trouvées dans [125] :

$$\|G_i(s)\|_\infty = \left\| \frac{v_i(s)}{v_{i-1}(s)} \right\|_\infty \leq 1 \quad \& \quad \|H_i(s)\|_\infty = \left\| \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} \right\|_\infty \leq \frac{h_i}{h_{i-1}} \tag{3.8}$$

où h_i est la constante de temps pour la loi TCI.

Plusieurs définitions et conditions pour vérifier la stabilité du convoi sont présentés. Des conditions sont données dans le domaine temporel et d'autres dans le domaine fréquentiel, pour des convois homogènes et non-homogènes. En général, il est plus facile de vérifier les conditions dans la domaine fréquentiel que dans le domaine temporel. Dans les travaux de thèse pour les convois homogènes [2, 5–8, 82–84] la définition (3.5) a été retenue et les conditions suffisantes ont été vérifiées. Pour les convois non homogènes [9], la définition donnée dans (3.2) a été utilisée pour prouver que les erreurs sont toujours bornées (même si elles ne sont pas nulles à l'état stationnaire).

3.2.2 Étude de la stabilité du convoi

Pour traiter le problème de la stabilité du convoi, dans un premier temps un modèle simple linéarisé du véhicule, donné par (2.60), est considéré. Pour le véhicule i , il vient :

$$\ddot{x}_i = W_i \quad (3.9)$$

Pour assurer la stabilité du convoi, l'entrée de chaque véhicule W doit dépendre des informations du véhicule et au même en plus des informations d'autres véhicules. Plusieurs commandes longitudinales peuvent être élaborées.

3.2.2.1 Commandes référencées sur le véhicule précédent

Dans ce cas, chaque véhicule reçoit la position et la vitesse relative du véhicule précédent. Il a été prouvé que ces informations ne sont pas suffisantes pour assurer la stabilité du convoi en conservant une distance constante entre les véhicules et en utilisant une commande homogène [73].

La loi de commande du i^{eme} véhicule afin de garder une distance fixe entre les véhicules est donnée par :

$$\ddot{x}_i = W_i = k_p e_i + k_v \dot{e}_i \quad (3.10)$$

où $k_p, k_v > 0$ assurant la convergence ($e_i, \dot{e}_i \rightarrow 0$).

La fonction de transfert de l' i -ème erreur va être établie.

De (3.10) l'erreur de $(i - 1)$ ème véhicule peut être calculé :

$$\ddot{x}_{i-1} = W_{i-1} = k_p e_{i-1} + k_v \dot{e}_{i-1} \quad (3.11)$$

en calculant la différence entre W_{i-1} et W_i il vient :

$$W_{i-1} - W_i = \ddot{x}_{i-1} - \ddot{x}_i = \ddot{e}_i \quad (3.12)$$

et donc :

$$\ddot{e}_i + k_p e_i + k_v \dot{e}_i = k_p e_{i-1} + k_v \dot{e}_{i-1} \quad (3.13)$$

La transformation de Laplace donne :

$$H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{k_v s + k_p}{s^2 + k_v s + k_p} \quad (3.14)$$

Il vient : $\exists \omega : |H(\omega)| > 1$ donc l'amplitude de l'erreur d'espacement augmente et la commande n'est pas stable.

Pour obtenir une commande stable sans communication, la distance entre véhicules doit être variable. Une nouvelle erreur peut être proposée de la forme :

$$\delta_i = e_i - h v_i \quad (3.15)$$

Où h est la constante de temps entre véhicules. La loi de commande devient :

$$W_i = k_p \delta_i + k_v \dot{e}_i \quad (3.16)$$

d'où

$$W_i = k_p e_i + k_v \dot{e}_i - k_p h v_i \quad (3.17)$$

Cette commande peut être représentée par le modèle de la figure (3.17). Pour h constant, la fonction de transfert devient :

$$H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{k_v s + k_p}{s^2 + (k_v + h k_p) s + k_p} \quad (3.18)$$

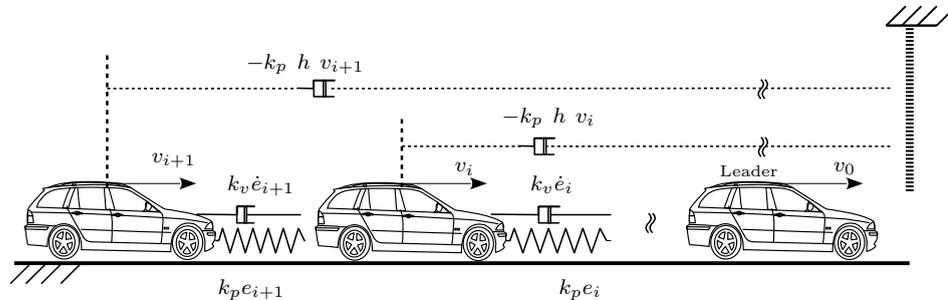


FIGURE 3.17: Commandes référencées sur le précédent avec une distance inter-véhicules proportionnelle à la vitesse

Il vient que $|G(\omega)| \leq 1 \quad \forall \omega$ donc le convoi est stable. Par contre la stabilité est faible, car la fonction de transfert peut devenir égale à 1, ce qui peut faire augmenter l'erreur d'espacement s'il y a des erreurs parasites aléatoires. Cette commande est appelé TCI et a déjà été mentionnée au paragraphe (3.1.3.2). Un cas particulier important de cette loi de commande est de choisir $k_p = \frac{h}{\lambda}$, $k_v = \frac{1}{\lambda}$, ce qui donne la fonction de transfert suivante :

$$H_i(s) = \frac{s + \lambda}{h s^2 + (1 + \lambda h) s + \lambda} = \frac{s + \lambda}{(s + \lambda)(h s + 1)} \quad (3.19)$$

donc :

$$H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{1}{h s + 1} \quad (3.20)$$

3.2.2.2 Commandes référencées sur le leader

Dans ce cas chaque véhicule reçoit les informations du leader, ce qui assure la stabilité mais n'assure pas la sécurité du convoi, car chaque véhicule ne connaît pas la situation du véhicule précédent. La loi de commande est donnée par les équations suivantes :

$$W_i = k_p e_{i,0} + k_v \dot{e}_{i,0} \quad (3.21)$$

où $e_{i,0} = x_0 - x_i - i l$.

La dynamique d'erreur d'espacement peut être calculé comme en calculant $W_{i-1} - W_i = \ddot{e}_i$:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_i &= k_p (x_0 - x_{i-1} - (i-1)l) + k_v (v_0 - v_{i-1}) - [k_p (x_0 - x_i - i l) + k_v (v_0 - v_i)] \\ &= -k_p (x_{i-1} - x_i - l) - k_v (v_{i-1} - v_i) \\ &= -k_p e_i - k_v \dot{e}_i \end{aligned} \quad (3.22)$$

Ce qui donne une dynamique stable de l'erreur d'espacement e_i :

$$\ddot{e}_i + k_v \dot{e}_i + k_p e_i = 0 \quad (3.23)$$

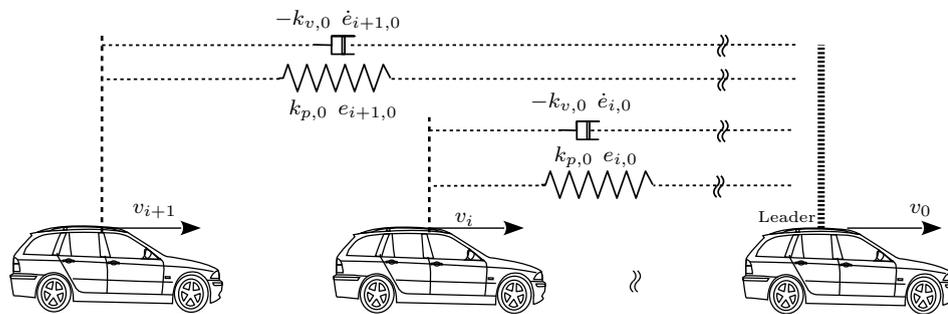


FIGURE 3.18: Commandes référencées sur le leader

3.2.2.3 Commandes référencées sur le leader et le véhicule précédent

Elles ont pour but de compenser les lacunes de chacune des deux précédentes méthodes. Elles assurent la stabilité sans risques de collisions (figure 3.19).

$$W_i = \underbrace{k_{p,0} e_{i,0} + k_{v,0} \dot{e}_{i,0}}_{\text{mixte}} + \underbrace{k_p e_i + k_v \dot{e}_i}_{\text{local}} \quad (3.24)$$

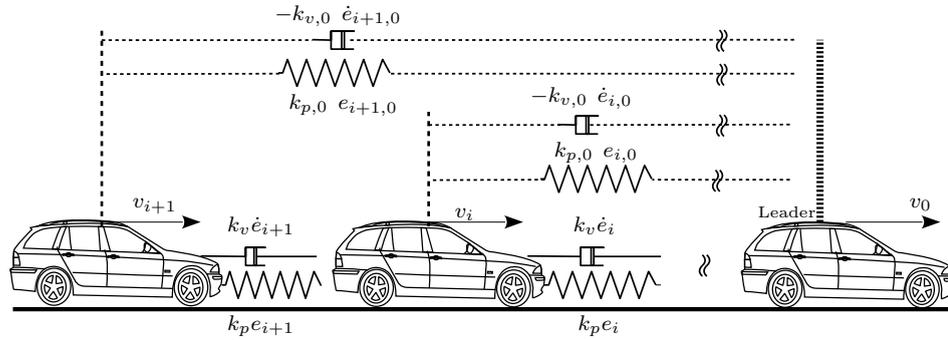


FIGURE 3.19: Commandes référencées sur le leader et le véhicule précédent

3.2.2.4 Commandes référencées sur le véhicule précédent et le suivant

Dans ce cas chaque véhicule reçoit les informations des véhicules précédent et suivant [69, 126–128]. La loi de commande est donnée par :

$$W_i = k_p e_i + k_v \dot{e}_i - (k_p e_{i+1} + k_v \dot{e}_{i+1}) \quad (3.25)$$

Cette commande est représentée par le modèle de la figure (2.29). La fonction de transfert de l'erreur est [69] :

$$H_1(s) = \frac{k_v s + k_p}{s^2 + 2k_v s + 2k_p} \quad (3.26)$$

$$H_i(s) = \frac{H_1(s)}{1 - H_{i-1}(s)H_1(s)} \quad (3.27)$$

Les valeurs qui assurent la stabilité du convoi peuvent être obtenues en utilisant une méthode numérique [69], et le convoi est plus sûr car les états du précédent et du suivant sont connus. Mais cette méthode exige plus de communications, et l'erreur peut se propager dans les deux sens.

3.2.2.5 Commandes référencées sur "r" véhicules précédents

Elles exigent beaucoup de communication et donnent un bon comportement, sans effet d'accordéon, mais elles n'assurent que la faible stabilité [65, 104] pour $r < N$.

3.2.2.6 Commandes référencées sur toutes les autres véhicules dans le convoi

La commande dépend des informations de tous les véhicules. La stabilité est obtenu mais exige beaucoup de communications.

3.2.3 Notion de sécurité

L'impact dangereux :

il y a un impact dangereux entre le i -ème véhicule et le $(i - 1)$ -ème si [129] :

$$\Delta x_i \leq 0 \quad \text{et} \quad -\Delta \dot{x}_i \geq v_{allowed} \quad (3.28)$$

Où $v_{allowed}$ est la vitesse d'impact maximale admissible. Dans ce qui suit $v_{allowed} = 0$.

La commande doit assurer tout le temps qu'il n'y a pas d'impact dangereux. Cela impose sur la commande d'autres contraintes que les contraintes de stabilité.

Dans la littérature, plusieurs approches sont proposées pour conserver la sécurité.

3.2.3.1 Intégration de la sécurité dans les lois de commande

Dans cette approche, les conditions de sécurité sont prises en compte lors du choix des paramètres de la loi de commande. [126, 129–132].

Dans [130] il est proposé des conditions sur les accélérations maximale et minimale des véhicules pour garder la sécurité du convoi quel que soit le nombre de véhicules. Des conditions sont obtenu à partir des scénarios les plus critiques. Par exemple, l'accélération maximale acceptable ont calculée lorsque les véhicules précédents freinent brutalement. Dans [130] la sécurité de la loi a été prouvée. La stabilité du convoi a été obtenue dans la simulation mais n'a pas été prouvée théoriquement.

Dans [129, 131, 132], les régions dans lesquelles le convoi peut être sécurisé ou non-sécurisé ont été établies. Les lois de commande pour les manœuvres les plus importantes pour les convois ont été étudiées. Ces manœuvres sont : le mode normal, joindre le convoi, séparation du convoi, changement de voie. Il été prouvé que le basculement entre ces lois est sécurisé si les variables d'état du convoi sont dans les régions sécurisées.

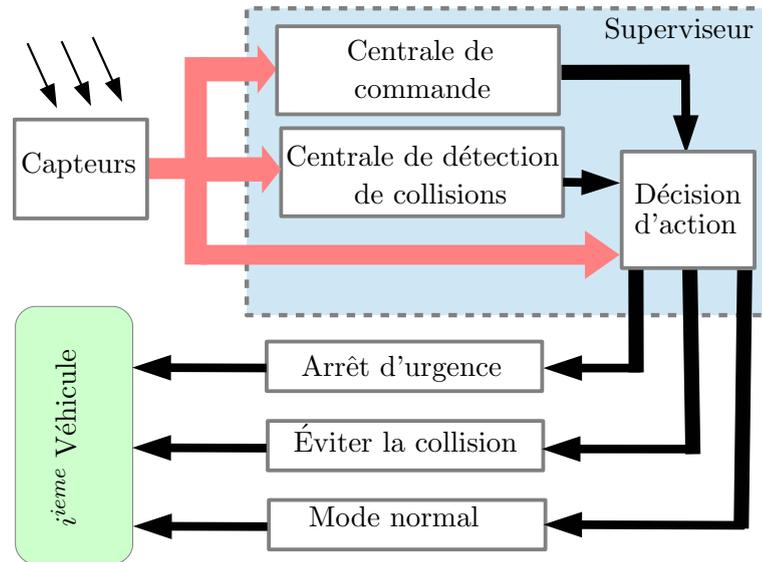


FIGURE 3.20: Schéma de la commande automatique avec un superviseur

Cook [126] a étudié la stabilité, la sécurité et le confort de trois approches de commande (commande référencée sur le prédécesseur, commande bidirectionnelle, commande référencée sur plusieurs prédécesseurs) en étudiant l'amplitude maximale de l'erreur et en choisissant les paramètres de commande qui maintiennent leurs amplitudes inférieures à la distance désirée entre véhicules. Aucune expérimentations et aucune simulations n'ont été faites pour montrer l'efficacité des conditions proposées.

Il est aussi possible d'intégrer un terme répulsif dans la loi de commande, qui pousse les deux véhicules dans des directions opposées quand elles se rapprochent l'une de l'autre [133, 134]. Cette approche a été utilisée pour éviter les obstacles.

3.2.3.2 Utilisation d'un observateur

Dans cet approche [135], un observateur central (ou même non-central) observe l'état du convoi et envoie des signaux lors de la détection de situations non-sûres. Les véhicules basculent alors du mode "normal" vers un mode "d'évitement de collision", comme indiqué figure 3.20.

Le premier choix donne toujours un système plus simple et il ne nécessite que les capteurs intégrés.

3.3 Les lois de commande longitudinales proposées pour les convois

Dans cette section, les lois de commande pour les convois développées dans le cadre de cette thèse sont présentées. Deux modèles du véhicule seront utilisés. Le premier modèle est le modèle linéarisé (2.55). Le deuxième modèle consiste en deux sous-modèles découplés (2.49) et (2.63) .

Le premier modèle est du deuxième ordre pour ce qui concerne le comportement longitudinal. Le seconde modèle est du troisième ordre.

Bien que l'espacement variable se traduise par de grandes distances d'espacement, les avantages qu'il présente par ailleurs ont poussé des chercheurs à tenter de réduire l'espacement pour rendre cette commande plus attractive. Une modification sur la loi de commande TCI a été proposée à cette effet.

3.3.1 La modification proposée

La proposition de la nouvelle erreur d'espacement (3.15) en ajoutant un terme propositionnel à la vitesse du véhicule permet d'assurer la stabilité du convoi sans communication mais augmente les distances inter-véhicules. Cette amélioration n'est pas due à l'augmentation de la distance inter-véhicule, mais au fait qu'elle est une fonction de la vitesse. Donc, l'idée principale de cette modification est de proposer une nouvelle erreur d'espacement en prenant une **vitesse relative** au lieu de la vitesse absolue. Cette idée a été expliquée dans la section (2.3.2) et a été montrée à la figure 2.37 qui est équivalente au modèle "Flatbed tow truck" représenté figure 2.38. Une nouvelle définition pour l'erreur d'espacement inter-véhicules est donc proposées :

$$\delta_i = e_i - h (\dot{x}_i - V) \quad (3.29)$$

Où V représente une vitesse (celle du camion virtuel) partagée entre tous les véhicules. Le choix de la vitesse V sera adressée plus tard dans la section (3.3.5).

3.3.2 La loi de commande longitudinale (système du deuxième ordre)

La loi de commande pour le système du deuxième ordre est donnée par :

$$W_{1i} = \frac{\dot{e}_i + \lambda \delta_i}{h} \quad (3.30)$$

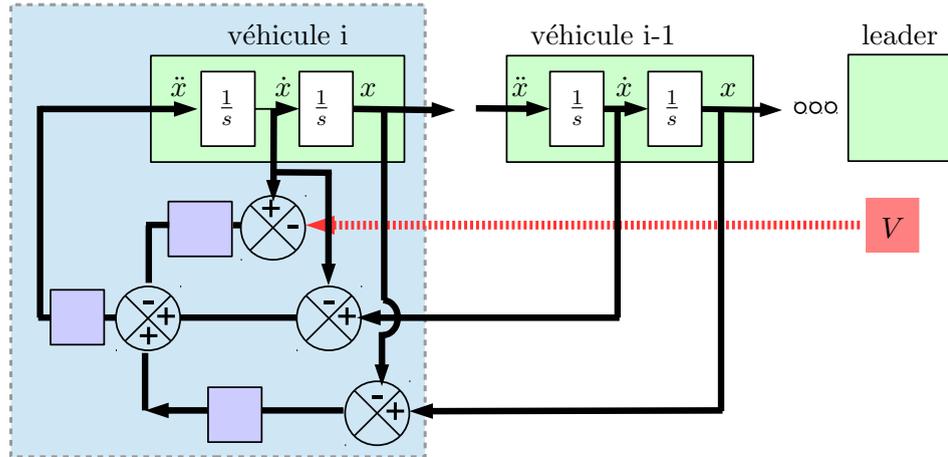


FIGURE 3.21: Schéma de contrôle longitudinal

Le schéma de la loi de commande est présenté figure (3.21) et la nouvelle modification a été représentée par la flèche pointillée.

Cette commande donne un convoi stable et la stabilité de ce modèle est la même que celle de la commande TCI classique (section suivante).

3.3.2.1 Stabilité de la commande longitudinale

Pour vérifier la stabilité, la fonction de propagation de l'erreur d'inter-distance est définie par $H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)}$.

Pour prouver la stabilité, il est suffisant d'avoir :

$$\|H_i(s)\|_\infty \leq 1 \quad \text{et} \quad h_i(t) > 0 \quad i = 1, 2..N \quad (3.31)$$

Où $h_i(t)$ est la réponse impulsionnelle de propagation de l'erreur de distance entre le véhicule $i - 1$ et le véhicule i .

Pour trouver la dynamique de l'erreur d'espacement, la commande du i^{eme} véhicule peut être écrite selon (3.30) et (3.29) comme suit :

$$h W_{1i} = h \ddot{x}_i = \dot{e}_i + \lambda e_i - h \lambda (v_i - V) \quad (3.32)$$

et pour le $(i - 1)$ -ème véhicule il vient :

$$h W_{1i-1} = h \ddot{x}_{i-1} = \dot{e}_{i-1} + \lambda e_{i-1} - h \lambda (v_{i-1} - V) \quad (3.33)$$

Donc la dynamique de l'erreur :

$$h \ddot{e}_i + (1 + \lambda h) \dot{e}_i + \lambda e_i = \dot{e}_{i-1} + \lambda e_{i-1} \quad (3.34)$$

La dynamique de la première erreur e_1 peut être calculée de ($W_0 = \ddot{x}_0 = a_0$) et (3.32) pour $i = 1$ il vient :

$$h (\ddot{x}_0 - \ddot{x}_1) = h W_0 - [\dot{e}_1 + \lambda e_1 - h \lambda (v_1 - V)] \quad (3.35)$$

Donc la dynamique de la première erreur est :

$$\begin{aligned} h \ddot{e}_1 + \dot{e}_1 + \lambda e_1 &= h W_0 + \lambda h (v_1 - V) \\ &= h a_0 + \lambda h (v_1 - V) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Il est clair que la dynamique de $i^{ème}$ l'erreur ($i \neq 1$) est indépendante de V , à la condition que V soit identique pour tous les véhicules au même instant. Cela donne la fonction de transfert de l'erreur d'espacement $H_i(s)$ suivante :

$$H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{s + \lambda}{h s^2 + (1 + \lambda h) s + \lambda}$$

$$\Rightarrow H_i(s) = \frac{1}{h s + 1} \quad (3.37)$$

Cette fonction de transfert est identique à la fonction de transfert d'un convoi en utilisant la loi TCI donnée dans (3.20). La stabilité est donc conservée, mais, comme il sera montré, les distances inter-véhicules vont pouvoir être plus petites.

Par calcul, il vient :

$$|H_i(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{h^2 \omega^2 + 1}} \leq 1 \quad , \quad h_i(t) = \frac{e^{-\frac{t}{h}}}{h} > 0 \quad (3.38)$$

Donc le convoi est stable puisque les erreurs d'espacement, pour toutes les fréquences, diminuent quand elles se propagent le long du convoi. Il est clair que la stabilité du convoi est indépendante de V , et que la seule condition sur V est d'avoir la même valeur pour tous les véhicules au même échantillon. Donc, le choix de V peut être quelconque, ce peut être la vitesse du leader, la vitesse moyenne du convoi, la vitesse minimale...

La faiblesse principale de cette loi de commande est que l'amplitude de la fonction de transfert devient égale à 1 autour des fréquences très basses, ce qui donne une faible stabilité. Dans ce cas, la stabilité devient très sensible aux erreurs parasites.

3.3.2.2 Robustesse de la commande vis-à-vis des erreurs de modélisation du moteur et des retards de détection

En général, les modèles proposés pour les moteurs sont des approximations de la réalité. Les dynamiques qui ne sont pas prises en compte dans le modèle sont en général représentées par un retard dans la réponse des actionneurs. De plus, le filtrage des données des capteurs peut aussi engendrer un retard additionnel. Il faut donc étudier la stabilité de notre commande en présence d'un retard pour vérifier sa robustesse. Les retards des actionneurs et de filtrage peuvent être exprimés comme suit [106] :

$$\tau \ddot{x}_i + \dot{x}_i = W_i \quad (3.39)$$

où : τ représente le retard, W_i l'entrée de commande de i^{eme} véhicule.

Une nouvelle fonction de transfert de l'erreur d'espacement est obtenue comme suivante :

Des (3.39), (3.29) et (3.30) il vient :

$$\tau \ddot{x}_i + \ddot{x}_i = W_i = \frac{\dot{e}_i + \lambda e_i - \lambda h (\dot{x}_i - V)}{h} \quad (3.40)$$

en calculant $(W_{i-1} - W_i)$:

$$h \tau \ddot{e}_i + h \ddot{e}_i = \dot{e}_{i-1} + \lambda e_{i-1} - \lambda h (\dot{x}_{i-1} - V) - (\dot{e}_i + \lambda e_i - \lambda h (\dot{x}_i - V)) \quad (3.41)$$

donc la dynamique d'erreur d'espacement en présence de retard d'actionnement devient :

$$h \tau \ddot{e}_i + h \ddot{e}_i + (1 + \lambda h) \dot{e}_i + \lambda e_i = \dot{e}_{i-1} + \lambda e_{i-1} \quad (3.42)$$

puis en faisant la transformation de Laplace, la fonction de transfert d'erreur en présence du retard d'actionnement peut être obtenue :

$$H_r(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{s + \lambda}{\tau h s^3 + h s^2 + (1 + \lambda h) s + \lambda} \quad (3.43)$$

L'indice r est utilisé dans H_r pour indiquer qu'il s'agit de la fonction de transfert de l'erreur d'espacement du système avec retard.

La condition de stabilité dans ce cas est $|H_r(\omega)| \leq 1$ pour tout ω . Donc il faut :

$$|H_r(\omega)| = \sqrt{\frac{\omega^2 + \lambda^2}{(\lambda - h \omega^2)^2 + ((1 + \lambda h) \omega - \tau h \omega^3)^2}} \leq 1 \quad (3.44)$$

Donc il vient :

$$\omega^2 + \lambda^2 \leq (\lambda - h \omega^2)^2 + (1 + \lambda h - \tau h \omega^2)^2 \omega^2 \quad (3.45)$$

Ce qui est équivalent à :

$$\tau^2 h^2 \omega^4 + (h^2 - 2 \tau h (1 + \lambda h)) \omega^2 + \lambda^2 h^2 \geq 0 \quad (3.46)$$

Ces conditions sont satisfaites si et seulement si les coefficients de ω^2 sont positifs ou le discriminant est négatif. Une condition suffisante qui satisfait les deux conditions est [65] :

$$\tau \leq \frac{h}{2} \quad (3.47)$$

Donc pour avoir une stabilité en présence d'un retard τ d'actionnement et de capteurs, la constante de temps h entre les véhicules doit être supérieure à 2τ

3.3.2.3 Les dynamiques ignorées du moteur et l'erreur d'espacement stationnaire

Un but important de la commande est de rendre les distances entre véhicules égales à la distance désirée, et donc de faire tendre e_i vers 0 à l'état stationnaire ($a_0 = 0$, $v_0 = v_d$). Pour un modèle idéal pour le véhicule (double intégrateur) les erreurs d'espacement deviennent zéro à l'équilibre (comme il sera démontré dans la première partie de cette discussion). Pratiquement, le modèle du moteur est ignoré. Ceci a un effet négatif sur les erreurs d'espacement e_i (comme nous le monterons dans la deuxième partie de cette discussion).

A l'équilibre, $\ddot{e}_i \rightarrow 0$ et $\dot{e}_i \rightarrow 0$, donc :

$$v_i = v_{i-1} = \dots = v_0 = v_d \quad (3.48)$$

et

$$a_i = a_{i-1} = \dots = a_0 = 0 \quad (3.49)$$

1- L'erreur stationnaire pour un véhicule avec un modèle idéal (double intégrateur)

À l'équilibre, l' i -ème erreur, donné par (3.34), devient :

$$e_i = e_{i-1}, \quad i = 2 \dots N$$

et la première erreur, donnée par (3.36), devient :

$$\lambda e_1 = h a_0 + \lambda h (v_1 - V)$$

Il vient :

$$e_1 = e_2 = \dots = e_N = \frac{1}{\lambda} (h a_0 + \lambda h (v_1 - V)) \quad (3.50)$$

L'équation (3.50) montre que les erreurs statiques d'espace, à l'équilibre, sont les mêmes pour tous les véhicules, et sont égales à l'accélération du leader a_0 multipliée par h/λ , en plus de $h (v_1 - V)$. En choisissant $V = v_0$, et rappelant que $a_0 = 0$, l'erreur d'état stationnaire devient :

$$e_1 = e_2 = \dots = e_N = 0 \quad (3.51)$$

2- L'erreur stationnaire pour un véhicule en prenant en compte le moteur

En pratique, le modèle du véhicule réel ne sera pas strictement équivalent à un double intégrateur parce que le modèle du moteur n'a pas été pris en compte. Le modèle de vitesse du véhicule est donné par :

$$\frac{V_i(s)}{W_i(s)} = \frac{K_m}{1 + T_m s} \quad (3.52)$$

il vient :

$$W_i = \frac{1}{K_m}(v_i + T_m \dot{v}_i) \quad (3.53)$$

La dynamique de l'erreur d'espacement devient donc :

$$\frac{T_m}{K_m} h \ddot{e}_i + \left(\frac{h}{K_m} + 1 + \lambda h\right) \dot{e}_i + \lambda e_i = \dot{e}_{i-1} + \lambda e_{i-1} \quad (3.54)$$

et la dynamique de la première erreur est :

$$h \ddot{e}_i + \left(\frac{h}{K_m} + 1\right) \dot{e}_i + \lambda e_i = h W_0 + \lambda h (v_1 - V) \quad (3.55)$$

À l'équilibre, l'erreur d'espacement (3.54) devient :

$$e_i = e_{i-1} \quad (3.56)$$

et l'erreur du premier véhicule (3.55) devient :

$$\lambda e_1 = h W_0 + \lambda h (v_1 - V) \quad (3.57)$$

De (3.56) et (3.57) il vient :

$$e_i = \dots = e_1 = \frac{1}{\lambda}(h W_0 + \lambda h (v_1 - V)) \quad (3.58)$$

En choisissant $V = v_0$, le deuxième terme deviendra à l'équilibre égal à zéro. Alors, l'erreur à l'état stationnaire, en considérant l'effet du moteur, devient :

$$e_1 = e_2 = \dots = e_N = \frac{h}{\lambda} W_0 \quad (3.59)$$

Selon (3.53), l'entrée du leader W_0 sera, à l'équilibre, égal à $\frac{V_d}{K_m}$, et donc l'erreur stationnaire devient :

$$e_1 = e_2 = \dots = e_N = \frac{h}{\lambda K_m} V_d \quad (3.60)$$

L'erreur est une fonction de la vitesse désirée. De toute évidence, le modèle du moteur doit être défini et pris en compte.

3.3.3 La loi de commande longitudinale (système du troisième ordre)

La loi de commande pour le système du troisième ordre est donnée par :

$$W_{1i} = -k_a \ddot{x}_i + k_v \dot{e}_i + k_p \delta_i \quad (3.61)$$

où k_a, k_v, k_p sont les paramètres de la loi de commande. Le schéma de la loi de commande est présenté à la figure (3.21) et la nouvelle modification a été représentée par la flèche pointillée.

La stabilité du convoi est analysée dans ce qui suit.

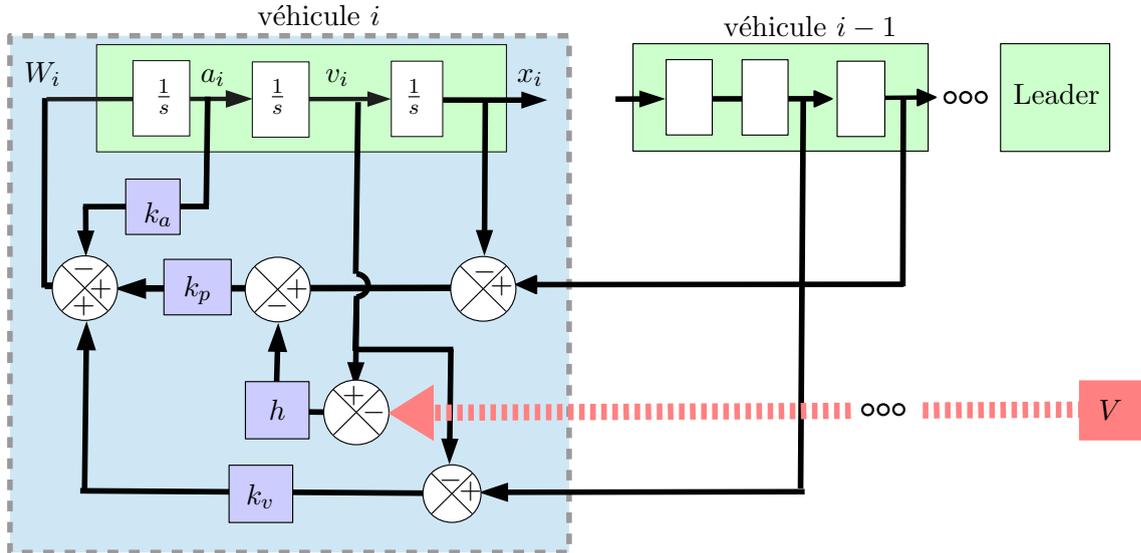


FIGURE 3.22: Schéma de commande du i^{ieme} véhicule avec la nouvelle modification (en rouge)

3.3.3.1 Stabilité de la commande longitudinale

Pour vérifier la stabilité, il est suffisant d'assurer les conditions (3.31). Donc la fonction de propagation de l'erreur de distance inter-véhicule $H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)}$ peut être trouvée.

$$H_i(s) = \frac{k_v s + k_p}{s^3 + k_a s^2 + (k_v + h k_p) s + k_p} \quad (3.62)$$

La fonction de transfert **ne** dépend **pas** de V et cette fonction est exactement la même fonction de transfert que dans la CTI classique ($V = 0$).

La norme $\|H_i\|$ peut être calculé :

$$\|H_i\| = \sqrt{\frac{k_p^2 + k_v^2 \omega^2}{(k_p - k_a \omega^2)^2 + ((k_v + k_p h) \omega - \omega^3)^2}} \quad (3.63)$$

Il faut trouver les conditions qui satisfont $\|H_i\| \leq 1$, donc il vient :

$$\omega^6 + \beta_{t1} \omega^4 + \beta_{t2} \omega^2 \geq 0 \quad \forall \omega \quad (3.64)$$

où :

$$\beta_{t_1} = k_a^2 - 2(k_v + k_p h), \quad \beta_{t_2} = k_p^2 h^2 + 2 k_p (k_v h - k_a) \quad (3.65)$$

Comme $\omega > 0$, (3.64) est équivalent à :

$$\omega^4 + \beta_{t_1} \omega^2 + \beta_{t_2} \geq 0 \quad \forall \omega \quad (3.66)$$

Cette condition est satisfaite si et seulement si les coefficients de ω^2 sont positifs ou le discriminant est négatif ($\beta_{t_1}^2 - 4\beta_{t_2} \leq 0$). Des conditions suffisantes pour satisfaire les deux conditions sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_a^2 - 2 k_v - 2 k_p h \geq 0 \\ k_p^2 h^2 + 2 k_v k_p h - 2 k_a k_p \geq 0 \end{array} \right\} \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} h k_a \geq 2 \\ k_a^2 \geq 2k_v \\ 2k_v \geq k_a^2 - \sqrt{4k_a k_p (k_a h - 2)} \end{array} \right\} \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} h k_a \geq 2 \\ k_a^2 \leq 2k_v \\ 2k_v \leq k_a^2 + \sqrt{4k_a k_p (k_a h - 2)} \end{array} \right\} \quad (3.67)$$

Les conditions de stabilité du convoi homogène (avec un modèle du troisième ordre pour le comportement longitudinal) sont trouvée.

3.3.3.2 Sécurité de la commande longitudinale

Pour un convoi homogène stable, l'erreur maximale entre les véhicules est l'erreur entre le leader et le premier véhicule.

En choisissant $V = v_0$ on obtient la première erreur dans le convoi par :

$$H_1(s) = \frac{e_1(s)}{a_0(s)} \quad (3.68)$$

$$H_1(s) = \frac{s + k_a}{s^3 + k_a s^2 + (k_v + h k_p) s + k_p} \quad (3.69)$$

$\|H_1(\omega)\|$ est :

$$\|H_1(\omega)\| = \sqrt{\frac{k_a^2 + \omega^2}{(k_p - k_a \omega^2)^2 + ((k_v + k_p h) \omega - \omega^3)^2}} \quad (3.70)$$

Selon (3.68), (A.11) et (A.12), la norme maximale de l'erreur est définie par l'accélération maximale du leader.

$$\|e_1(t)\|_\infty \leq \|H_1(\omega)\|_\infty \|a_0(t)\|_\infty \quad (3.71)$$

Une limite maximale pour e_1 , peut être établie en utilisant la relation suivante :

$$\|e_1(t)\|_\infty \leq \|H_1(\omega)\|_\infty \max(|a_{max}|, |a_{min}|) \quad (3.72)$$

Pour assurer la sécurité du convoi, e_1 doit rester inférieure à la distance souhaitée l en mode de décélération, sinon une collision peut avoir lieu. Une condition suffisante pour la sécurité est d'avoir :

$$\|e_1(t)\|_\infty \leq \|H_1(\omega)\|_\infty \max(|a_{max}|, |a_{min}|) \leq l \quad (3.73)$$

Il vient :

$$\omega^6 + \beta_{s_1}\omega^4 + \beta_{s_2}\omega^2 + \beta_{s_3} \geq 0 \quad \forall \omega \quad (3.74)$$

où :

$$\begin{aligned} \beta_{s_1} &= k_a^2 - 2(k_v + k_p h) \\ \beta_{s_2} &= (k_v + k_p h)^2 - 2k_p k_a - \frac{a_{min}^2}{l^2} \\ \beta_{s_3} &= kp^2 - k_a^2 \frac{a_{min}^2}{l^2} \end{aligned} \quad (3.75)$$

Pour simplifier β_{s_3} est choisi tel que $\beta_{s_3} \geq 0$. Dans ce cas, la condition suffisante pour assurer (3.74) devient :

$$\omega^6 + \beta_{s_1}\omega^4 + \beta_{s_2}\omega^2 \geq 0 \quad \forall \omega \quad (3.76)$$

Comme $\omega > 0$, la relation (3.76) est équivalente à :

$$\omega^4 + \beta_{s_1}\omega^2 + \beta_{s_2} \geq 0 \quad \forall \omega \quad (3.77)$$

Cette condition est satisfaite si et seulement si les coefficients de ω^2 sont positifs ou le discriminant est négatif. Les conditions suffisantes pour assurer la sécurité du convoi homogène sont donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_p \geq \frac{|a_{min}|}{l} k_a \\ k_a^4 - 4 (k_v + k_p h) k_a^2 + 8 k_p k_a + 4 \frac{a_{min}^2}{l^2} \leq 0 \end{array} \right\} \text{ où } \left\{ \begin{array}{l} k_p \geq \frac{|a_{min}|}{l} k_a \\ k_a^2 \geq 2 (k_v + k_p h) \\ (k_v + k_p h)^2 \geq 2 k_p k_a + \frac{a_{min}^2}{l^2} \end{array} \right\} \quad (3.78)$$

3.3.4 La loi de commande longitudinale en milieu urbain

Pour un milieu urbain, l'abscisse curviligne (définie dans la section (2.3.4)) est utilisé. La loi de commande présentée dans (3.29) est adaptée aux convois autoroutiers, et ne peut pas être utilisée pour les convois urbains car elle utilise une coordonnée linéaire. La loi de commande proposée est adaptée pour les convois en milieu urbain.

L'erreur d'espace proposé pour les convois sur autoroute donnée dans (3.29) devient :

$$\delta_i = e_i - h (v_{u_i} - V) \quad (3.79)$$

où v_{u_i} est la vitesse longitudinale de la i^{ieme} véhicule, e_i l'erreur curviligne.

La loi de commande longitudinale pour les véhicules est :

$$W_{1i} = \frac{\dot{e}_i + \lambda \delta_i}{h} \quad (3.80)$$

En utilisant la première partie de (2.55) avec (3.79), (3.80) et en supposant une commande latérale stable avec de petites erreurs, la fonction de transfert peut être obtenue :

$$H_i(s) = \frac{e_i(s)}{e_{i-1}(s)} = \frac{s + \lambda}{h s^2 + (1 + \lambda h) s + \lambda}$$

$$H_i(s) = \frac{1}{h s + 1} \quad (3.81)$$

La fonction de transfert est donc identique à celle établie pour les convois autoroutiers.

3.3.5 Supervision de V

La condition unique sur V pour garder la stabilité du convoi est d'avoir la même valeur pour tous les véhicules dans le même échantillon, et par conséquent n'importe quelle vitesse pour V (vitesse du leader, vitesse minimale du convoi, vitesse moyenne...) peut être utilisée.

Pour augmenter la sécurité et éviter les collisions, un premier choix pourrait être $V = \min(v_{Leader}, v_1, v_2, \dots, v_N)$. Dans ce cas le terme $h(v_i - V)$ est toujours positif et donc $x_i - x_{i-1} = l + h(v_i - V) > l$, ce qui peut augmenter la distance entre véhicules pendant les phases transitoires, mais présente l'avantage d'augmenter la sécurité.

Le choix, $V = \max(v_0, v_1, v_2, \dots, v_n)$ induit $h(v_i - V) \leq 0$, donc l'espacement est toujours inférieur ou égal à l . Cela réduira les distances entre véhicules lors des changements de vitesse, mais diminuera la sécurité et peut provoquer des collisions. Ce n'est donc pas un choix judicieux.

Si V est choisit comme la vitesse moyenne du convoi, le taux de variation de V va être lié à la dynamique d'ensemble du convoi. Cette dynamique est représentée comme un camion lourd dans notre nouveau modèle, et est beaucoup plus lente que la dynamique des erreurs d'espacement inter-véhicules. La stabilité n'est pas liée à V , donc avec l'idée de la dynamique lente, il est possible de mettre à jour V à une fréquence plus faible que la fréquence d'échantillonnage de chaque véhicule.

La mise à jour de V à une fréquence faible peut toutefois faire varier les valeurs de V de manière sensible lors des mises à jour, ce qui peut avoir un effet négatif sur la commande. Dans un tel cas, il serait bien d'interpoler les valeurs de V pour éviter les changements rapides.

3.3.6 Avantages et comparaison

La nouvelle loi utilise une distance proportionnelle à la différence entre la vitesse du véhicule et une vitesse partagée par tous les véhicules du convoi, au lieu d'être proportionnelle à la vitesse du véhicule comme dans la commande TCI. Elle permet de réduire les distances entre les véhicules en conservant la stabilité du convoi.

La nouvelle loi de commande présente de nombreux avantages par rapport à la commande TCI et à l'approche de distance constante entre véhicules.

Dans l'équation (3.37) la fonction de propagation de l'erreur n'est pas une fonction de la vitesse partagée V , donc V n'a pas d'effet négatif sur la stabilité. De plus, la fonction de transfert $H(s)$ est égale à la fonction de transfert de l'erreur de la loi TCI [106, 108] donné sous la forme (3.20). Les deux lois présentent les mêmes caractéristiques de stabilité pour des paramètres identiques, mais avec des distances entre véhicules plus faibles en utilisant la loi proposée

Dans la loi TCI, la distance entre les véhicules est proportionnelle à la vitesse du véhicule et égale à $\Delta X_i = l + h v_i$. Ces distances peuvent être très grandes à vitesse élevée [106]. Dans la loi proposée, la distance devient proportionnelle à la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse partagée $\Delta X_i = l + h (v_i - V)$. Dans l'état stationnaire, $v_i = v_0$ donc $X_{i-1} - X_i = l + h (v_0 - V)$ et la distance entre les véhicules devient égale à l . Par exemple V peut être choisi tel que $V = v_0$.

Le risque de collision augmente quand la distance entre véhicules diminue. Le problème de la stabilité a été étudié, et les inter-distances ont été réduites tout en assurant la stabilité du convoi, sans discuter encore la sécurité et les collisions. Le risque de collision sera étudié et pris en compte dans le chapitre suivant.

L'utilisation de V dans la nouvelle loi implique une communication entre les véhicules. Dans la section (3.3.5) il a été montré qu'il n'est pas important de mettre à jour la valeur de V à chaque échantillon, mais qu'il est suffisant de la mettre à jour à une fréquence plus faible, ce qui limite les besoins de communication.

Dans la nouvelle loi, la stabilité du convoi reste assurée même si la communication a été totalement perdue. La stabilité reste conservée en imposant $V = 0$ au moment de la perte de communication. Dans ce cas, les véhicules deviennent totalement autonomes, et il n'est pas important de communiquer avec le leader. Au contraire, il a été prouvé dans [73] que, pour un loi de commande qui garde une distance constante entre les véhicules dans un convoi homogène avec une commande homogène (mêmes paramètres pour tous les véhicules), il n'est pas possible d'obtenir un convoi stable sans communication au moins avec le leader.

La décision de basculer en mode autonome est envoyée par le leader vers tous les véhicules qui ont une communication fonctionnelle, au moment où le leader détecte une perte de communication avec l'un des véhicules. Pour les autres véhicules qui perdent la communication avec le leader, ils doivent basculer automatiquement en mode autonome.

Dans l'équation (3.47), la condition de stabilité en présence de retards, indique qu'il est préférable d'augmenter h pour assurer la stabilité. Dans la loi TCI, cette augmentation de h a un effet négatif sur la distance entre les véhicules. Mais dans la nouvelle loi, l'augmentation de h a une faible incidence sur la distance. De leur côté, les commandes les plus simples correspondante à la stratégie de distance constante entre véhicules ne sont pas toujours robustes vis-à-vis d'un retard, ou parfois seulement robustes à de faibles retards [65].

[106] a prouvé que le couple de commande est inversement proportionnel à h . Dans la loi TCI, h ne peut pas être augmenté h parce que la distance entre véhicules augmente, mais dans la nouvelle loi, h a une faible incidence sur la distance entre véhicules, et en conséquence limite la saturation.

La nouvelle loi de commande est du même niveau de complexité que la loi TCI. Elle utilise les mêmes paramètres que TCI, auxquels s'ajoute la vitesse partagée, mise à jour à une fréquence faible. Les stratégies de distance constante sont, elles, plus complexes et utilisent des informations plus difficiles à obtenir (accélération), au moins en provenance du leader.

3.4 La commande latérale

Comme il a été déjà expliqué dans la section (3.0.4.2), l'objectif principal de la commande latérale est de faire suivre au véhicule le chemin souhaité.

Pour le convoi, il y a deux approches principales de commande latérale : soit le véhicule suit la trajectoire du véhicule précédent, soit il suit une trajectoire commune (suivi de voie, trajectoire prédéfinie ou trajectoire du leader...).

La première approche est sujette au cumul d'erreurs latérales et peut conduire à une instabilité du comportement. Il n'est donc judicieux de l'utiliser seule. Mais lorsqu'elle est combinée avec la deuxième approche, la stabilité latérale peut être garantie [44].

Dans la suite, la commande latérale est faite en utilisant une commande robuste par mode glissant en suivant le chemin du leader. La commande par mode glissant a été choisi car il assure la stabilité même si les paramètres du système ne sont pas parfaitement identifiés et/ou même si le système varie lentement au cours du temps. L'inconvénient principal

de cette loi est la commutation autour de la surface de glissement (chattering). Il est possible de limiter ce problème en utilisant des fonctions signes adoucies [67].

3.4.1 Introduction de la commande robuste par mode glissant

Supposons le système suivant :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x) u \\ y &= h(x)\end{aligned}\tag{3.82}$$

La commande par mode glissant repose sur la notion de stabilité selon Lyapunov. Une fonction $V_{lyap}(x)$ dite fonction de Lyapunov (représente de l'énergie du système) peut être proposée, qui satisfait les conditions suivantes :

$$\begin{aligned}V_{lyap}(x) &> 0 \quad \text{pour} \quad V_{lyap}(0) = 0 \\ \dot{V}_{lyap}(x, u) &\leq 0 \quad \text{ou} \quad < 0\end{aligned}\tag{3.83}$$

$V_{lyap}(x)$ est définie positive, et \dot{V}_{lyap} est semi définie (ou définie) négative.

$V_{lyap}(x)$ est défini à partir d'une "pseudo sortie" ψ du système appelée surface de glissement, car le système en boucle fermée sera être forcé à glisser sur la surface d'équation $\psi(x) = 0$.

Un choix particulier de la pseudo-sortie $\psi(x)$ pour que la sortie y suive la trajectoire désirée y_{ref} s'écrit comme suit :

$$\psi(x) = \sum_{i=0}^{r-1} \lambda_i (y_{ref}(t) - y(t))^{(i)}\tag{3.84}$$

r est le degré relatif de la sortie y .

La commande par mode glissant amène les dynamiques du système sur la surface $\psi_i(x) = 0$. La dynamique de convergence de l'écart est assurée par le choix des coefficients λ_i .

En prenant une fonction de Lyapunov de la forme

$$V_{lyap}(x) = \frac{1}{2}\psi_i^2(x) \quad (3.85)$$

alors $\dot{V}_{lyap}(x) = \psi \dot{\psi}$

$$\dot{\psi} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} [f(x) + g(x) u] = S_1(x, t) + S_2(x) u \quad (3.86)$$

En prenant $u = u_{eq} + v_n$ de sorte que :

$$u_{eq} = \frac{S_1(x)}{S_2(x)} \quad \text{et} \quad v_n = \frac{u_n}{S_2(x)} \quad (3.87)$$

En faisant le bouclage $\dot{V}_{lyap} = \psi u_n$ il vient

Il faut rendre $\dot{V}_{lyap} < 0$ pour $S \neq 0$, il est suffisant de prendre :

$$u_n = -K \text{sign}(\psi) \quad (3.88)$$

où $K > 0$. Donc $\dot{V}_{lyap} = -K|\psi| \leq 0$

La dernière partie de la commande oblige le système à converger vers la surface même si les paramètres ne sont pas parfaitement identifiés et/ou même si le système varie lentement au cours du temps.

Un autre choix (donnant une commande linéaire) consiste à prendre :

$$u_n = -K\psi \quad (3.89)$$

qui rend $\dot{V}_{lyap} = -K\psi^2 \leq 0$. Le système stable est donc stable.

3.4.2 La commande latérale proposée

Pour ce qui concerne la commande latérale, la loi de commande utilisée est la même que pour les deux modèles (2.53 et 2.9).

Les variables d'état du système latéral pour le i ème véhicule sont :

$$\begin{array}{|l} d_i \\ \theta_{pi} \\ \dot{\theta}_{pi} \end{array}$$

Une commande par modes glissants est retenue, car elle donne un système stable et robuste. La surface de glissement est définie par :

$$\psi_i = \dot{\theta}_{pi} + k_{\theta p} \theta_{pi} + k_d d_i \quad (3.90)$$

Où $k_{\theta p}, k_d$ sont les coefficients de pondération.

Le contrôleur choisi impose au système de satisfaire l'équation suivante :

$$\dot{\psi}_i = -K \text{sign}(\psi_i) \quad (3.91)$$

où K est une constante positive.

A partir des équations (3.91), (3.90) et (2.55), la commande devient :

$$W_{2i} = -K \text{sign}(\psi_i) - k_{\theta p} \dot{\theta}_{pi} - k_d \dot{d}_i \quad (3.92)$$

qui donne un système stable selon Lyapunov.

Une autre loi de commande qui peut assurer la stabilité de la commande latérale et qui évite l'effet non-linéaire de la commande précédente (3.88), peut être obtenue en prenant (3.89), qui fait que le système satisfait l'équation suivante :

$$\dot{\psi}_i = -K \psi_i \quad (3.93)$$

où K est une constante positive.

A partir des équations (3.93), (3.90) et (2.55), la commande suivante est obtenue :

$$W_{2i} = -K \psi_i - k_{\theta p} \dot{\theta}_{pi} - k_d \dot{d}_i \quad (3.94)$$

donc :

$$W_{2i} = -K k_{\theta p} \theta_{pi} - (K + k_{\theta p}) \dot{\theta}_{pi} - k_d \dot{d}_i - K k_d d_i \quad (3.95)$$

Cette loi de commande représente le modèle donné figure (2.43). Le premier terme $K k_{\theta p} \theta_{pi}$ représente le moment généré par le premier ressort, qui agit comme un moment attractif vers la direction du chemin. Le moment généré par le premier amortisseur est égale au deuxième terme, $(K + k_{\theta p}) \dot{\theta}_{pi}$. Finalement, l'action du deuxième ensemble ressort-amortisseur est égale à $K k_d d_i$ et $k_d \dot{d}_i$, ce qui entraîne le véhicule vers le chemin.

3.5 Simulation et résultats

La simulation a été faite dans un premier temps sous Matlab puis en utilisant TORCS (figure 3.23). Les simulations dans TORCS ont été faites en utilisant une trajectoire en ligne droite pour vérifier la stabilité longitudinale de la commande sur autoroute et une trajectoire courbe (figure 3.30) pour vérifier la stabilité des commandes latérale et longitudinale en milieu urbain. Un convoi de 10 véhicules identiques avec des distances inter-véhicules initiales non égales a été considéré.

L'accélération maximale est fixée égale à 5 m/s^2 , ce qui dépasse les accélérations de confort de $3,4 \text{ m/s}^2$ définies par l'AASHTO [136], et dépasse également la capacité de la plupart des véhicules.



FIGURE 3.23: Un convoi dans TORCS

La décélération maximale est fixée égale à 5 m/s^2 , ce qui dépasse également la limite de confort. Le maximum et le minimum de l'à-coup (jerk) J sont imposés par l'exigence de conduite confortable et non par la limitation du véhicule [137], donc $J = 6 \text{ m/s}^3$.

Dans un premier temps, les conditions autoroutières ont été considérées. La distance désirée entre les véhicules est $l = 1 \text{ m}$. La vitesse maximale est 140 km/h . Les paramètres de commande sont choisis en respectant les conditions de stabilité et de sécurité du convoi données par (3.67) et (3.78). Les paramètres sont $k_p = 12$, $h = 4$, $k_a = 2.4$, $k_v = k_a/h$. Le choix de V est égale à la vitesse du leader, avec un taux de mise à jour égal au taux de mise à jour des véhicules, comme proposé dans (3.3.3.2).

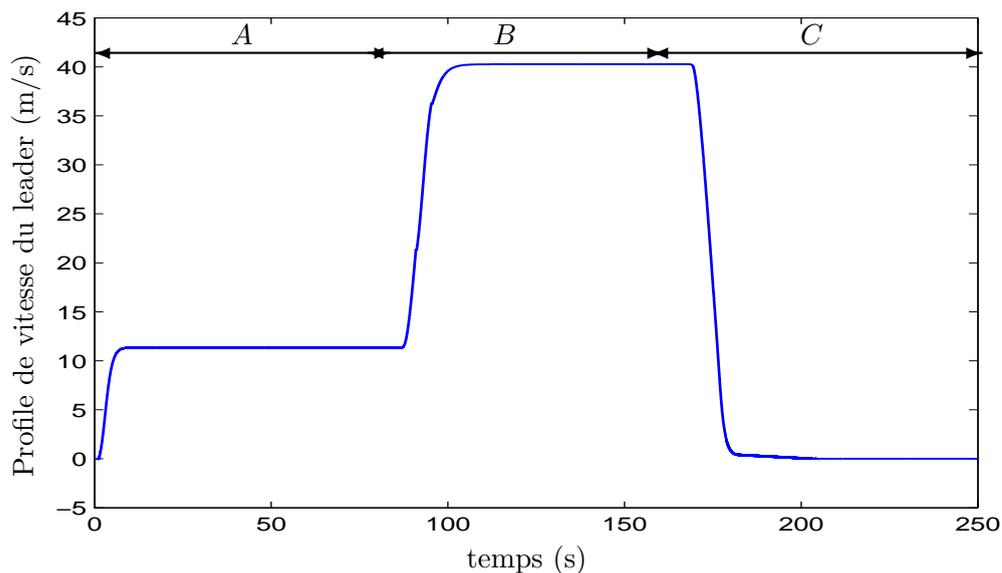


FIGURE 3.24: Le profil de vitesse du leader (conditions autoroutières)

Dans cette simulation, les scénarios étudiés sont :

- 1- La création du convoi à partir de l'état stationnaire (partie A),
- 2- Modification de la vitesse du convoi, de 40 km/h à 140 km/h , pour vérifier la stabilité du convoi dans le cas d'accélération extrême (au début de la partie B),
- 3- Vitesse fixe (partie B),
- 4- Un arrêt d'urgence lors du déplacement à la vitesse maximale pour vérifier la sécurité (partie C).

Dans toutes les simulations, le leader est conduit automatiquement. Le profil de la vitesse du leader est montré figure 3.24.

3.5.1 Comparaison avec les autres lois de commande

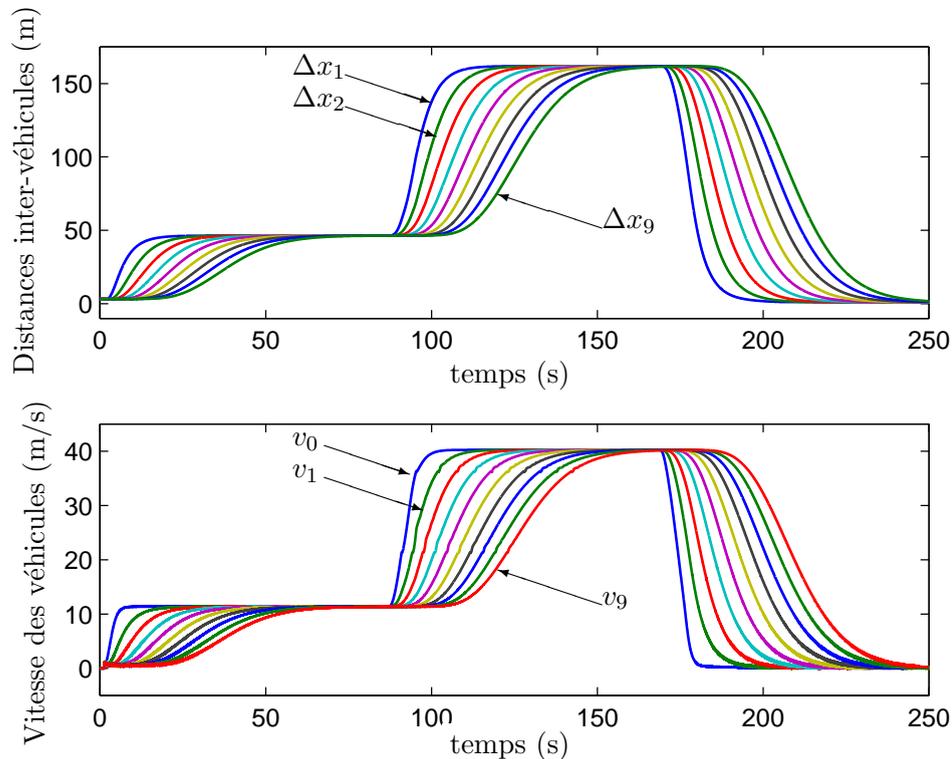


FIGURE 3.25: Les distances entre les véhicules et leurs vitesses en utilisant CTI (regardez la magnitude des erreurs d'espacement).

Pour montrer l'efficacité de la nouvelle proposition, une comparaison avec la TCI classique en utilisant les mêmes paramètres proposée. Les résultats montrent que les distances inter-véhicules ont été considérablement diminuées, passant de 150 m (figure 3.25) à 3 m maximum (figure 3.26) entre deux véhicules roulant à une vitesse 150 km/h . Ces

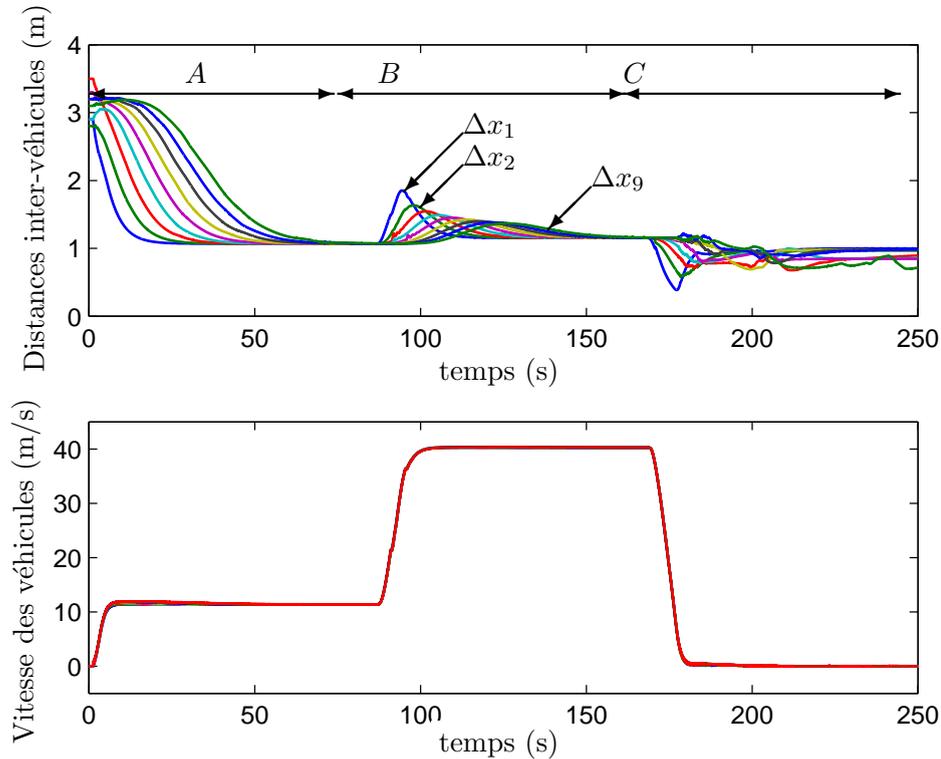


FIGURE 3.26: Les distances entre les véhicules et leurs vitesses en utilisant CTI modifiée (regardez la magnitude des erreurs d'espacement)

distances deviennent égales à la distance désirée en régime permanente, et proportionnelles à la différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse partagée V pendant la phase transitoire. Le système devient plus rapide.

3.5.2 Résultats en conditions autoroutières

La création du convoi à partir de l'état stationnaire est représentée figure 3.27. Les vitesses des véhicules convergent vers la vitesse du leader et les distances inter-véhicules convergent vers la distance désirée.

La sécurité du convoi en cas d'arrêt d'urgence est présentée figure 3.29. Dans ce cas, le leader roule à vitesse maximale et effectue un arrêt d'urgence avec la décélération maximale et l'à-coup maximal. Les distances inter-véhicules sont toujours supérieures à zéro, donc aucune collision ne se produit. Une distance additionnelle peut être ajoutée sur la distance désirée pour étendre la marge de sécurité.

La stabilité du convoi est claire dans les trois figures 3.27, 3.28 et 3.29 car les erreurs diminuent quand elles se propagent à travers le convoi et elles convergent vers zéro, de sorte que les distances inter-véhicules convergent vers la distance souhaitée.

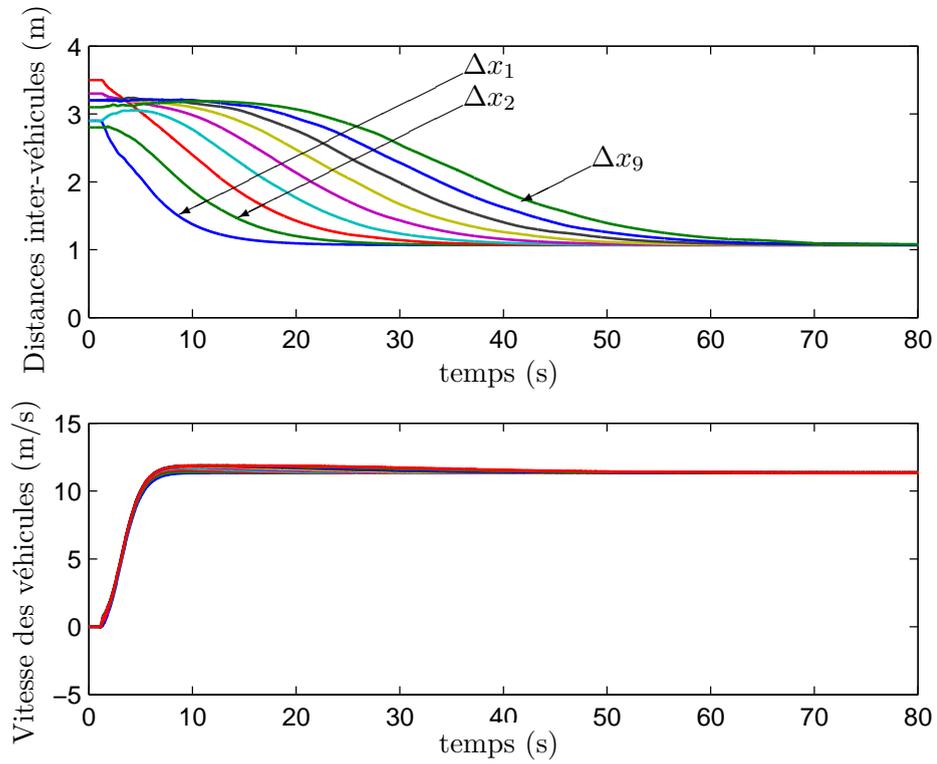


FIGURE 3.27: La création du convoi (tronçon A)

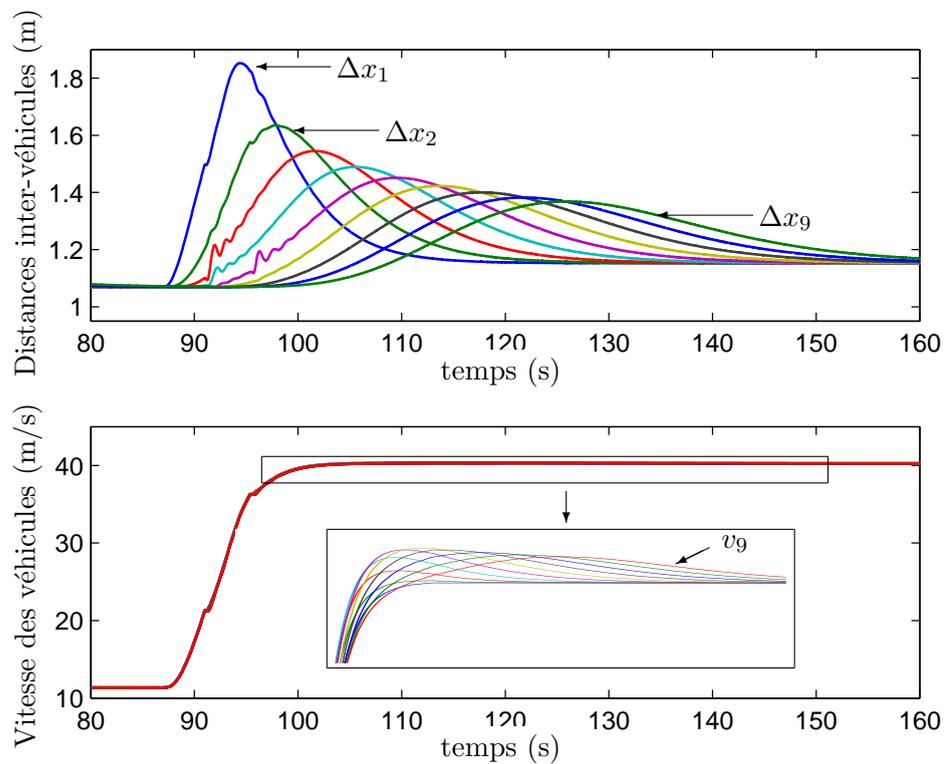


FIGURE 3.28: Changement de vitesse (tronçon B)

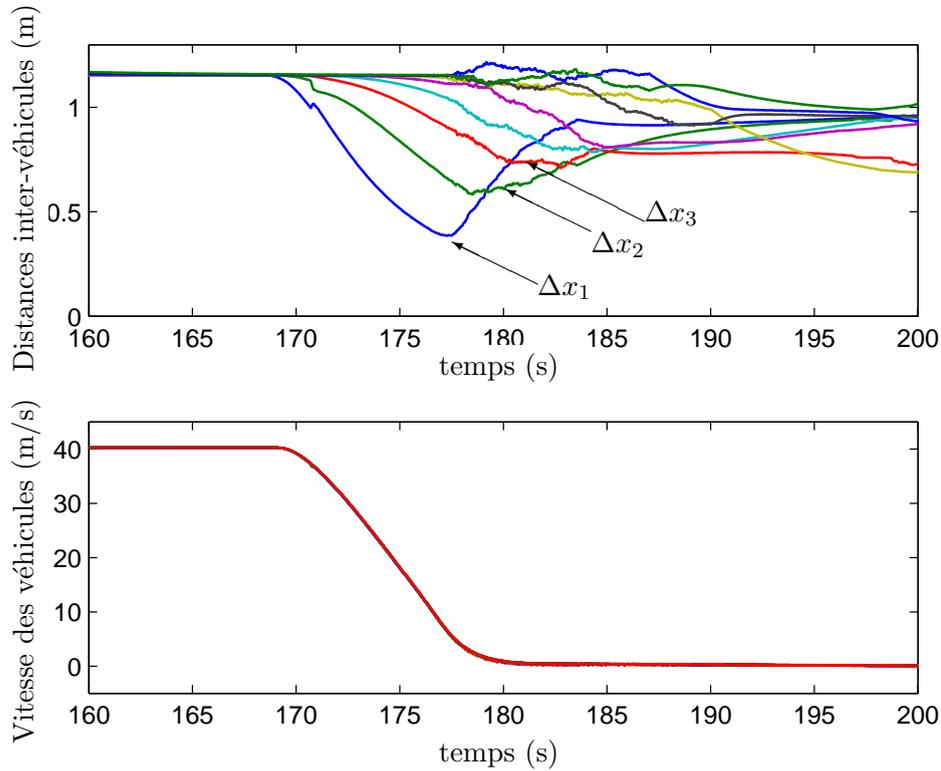


FIGURE 3.29: Arrêt d'urgence (tronçon C)

3.5.3 Résultats en milieu urbain

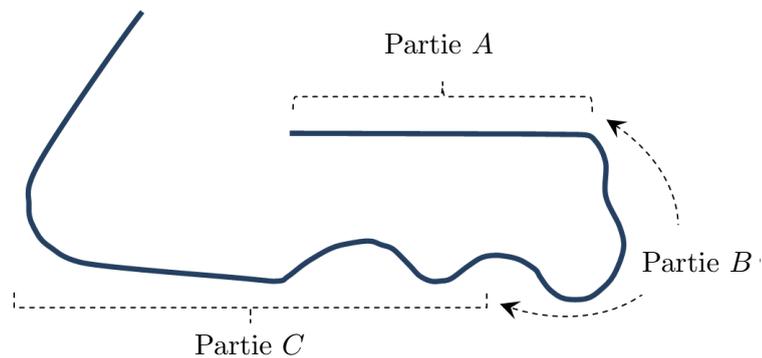


FIGURE 3.30: La trajectoire courbe dans TORCS (milieu urbain)

Une trajectoire courbe consistant en trois tronçons (figure 3.30) est considéré. Le premier tronçon est une partie quasiment droite (A). La stabilité de la commande longitudinale pendant la phase de création de convoi est vérifiée, en changeant la vitesse de 0 km/h à 25 km/h , puis en mode normal en changeant la vitesse à 60 km/h . Puis le convoi passe le deuxième tronçon, qui est courbe (B) avec une vitesse constante pour vérifier la stabilité de la commande latérale. Dans le tronçon C, la stabilité des deux commandes

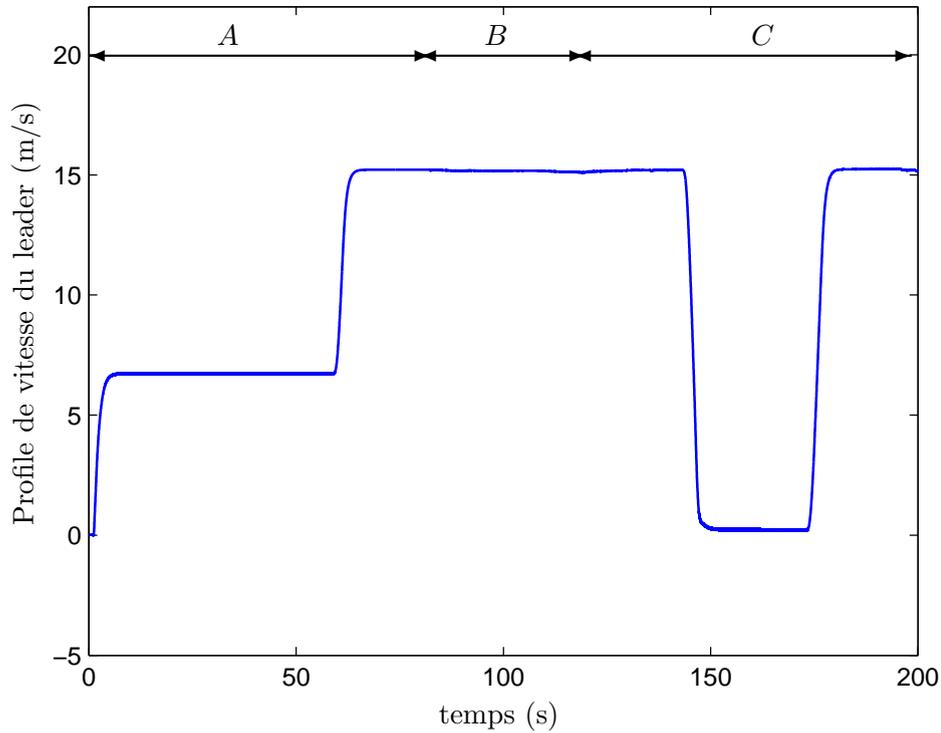


FIGURE 3.31: Le profil de vitesse du leader (milieu urbain)

ensemble est vérifiée. La vitesse du convoi passe de 60 km/h à 0 km/h puis à 60 km/h tous en passant le virage.

Les simulations pour les deux modèles (le premier modèle est le modèle du deuxième ordre avec couplage entre les deux dynamiques et le deuxième modèle est du troisième ordre sans couplage entre les deux dynamiques) sont réalisées pour vérifier l'efficacité de la commande, et les avantages relatifs à l'utilisation de chaque modèle. Le modèle du moteur du véhicule dans TORCS a été modifié en ajoutant un retard τ pour la deuxième simulation, afin de rendre le modèle dans TORCS plus réaliste et pour vérifier l'efficacité et la robustesse de la commande.

Dans un premier temps, les erreurs d'espacement longitudinal lors d'utilisation du premier modèle dans la figure (3.32) sont plus grandes que pour le deuxième modèle (3.34). Cette amélioration est très intuitive car un modèle plus précis a été utilisé pour la dynamique longitudinale. Pour la commande latérale, il n'y a pas de grande différence entre les erreurs latérales pour les deux modèles dans les figures (3.33) et (3.35), ce qui va dans le sens de notre hypothèse que les deux dynamiques sont découplées.

Pour le premier modèle, les distances entre les véhicules ne sont pas égales à la distance désirée comme il a été montré à la section (3.3.2.3). Le premier modèle n'est pas très

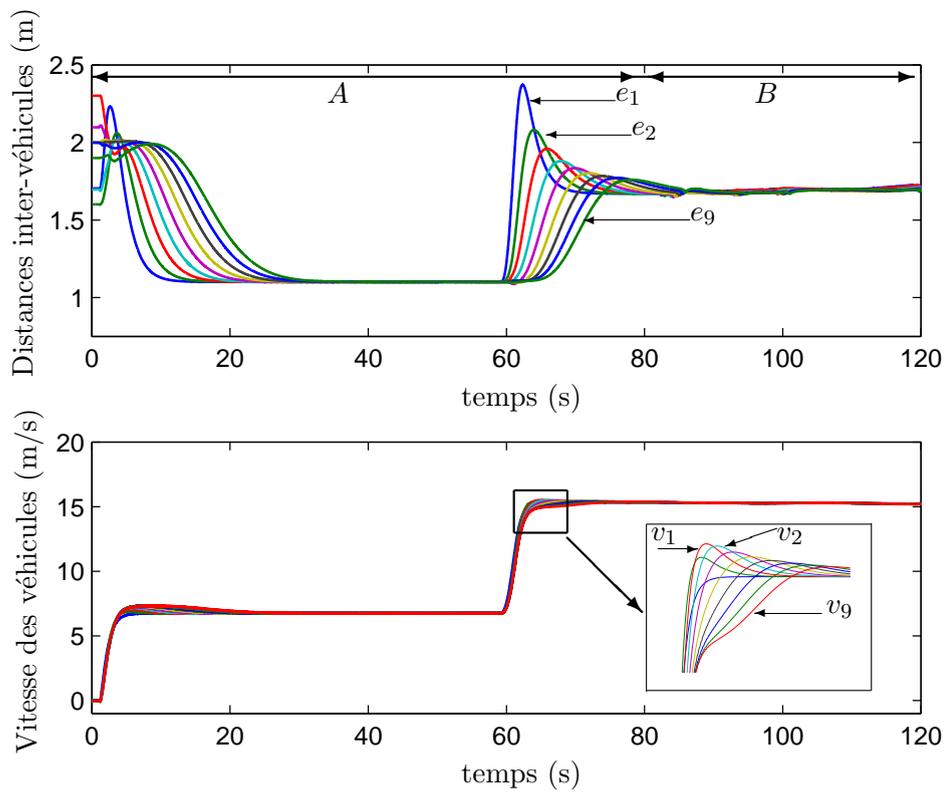


FIGURE 3.32: Les distances inter-véhicules et les vitesses des véhicules (tronçons A, B) pour le premier modèle.

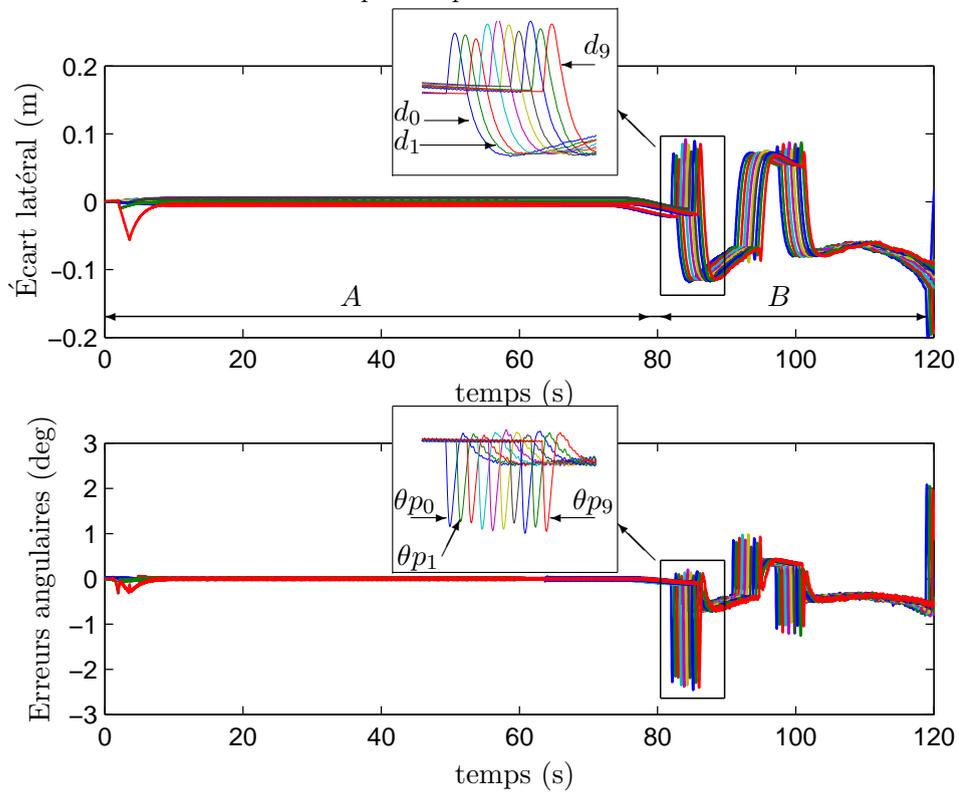


FIGURE 3.33: Les erreurs latérales (angle et écart) (Tronçons A, B) pour le premier modèle.

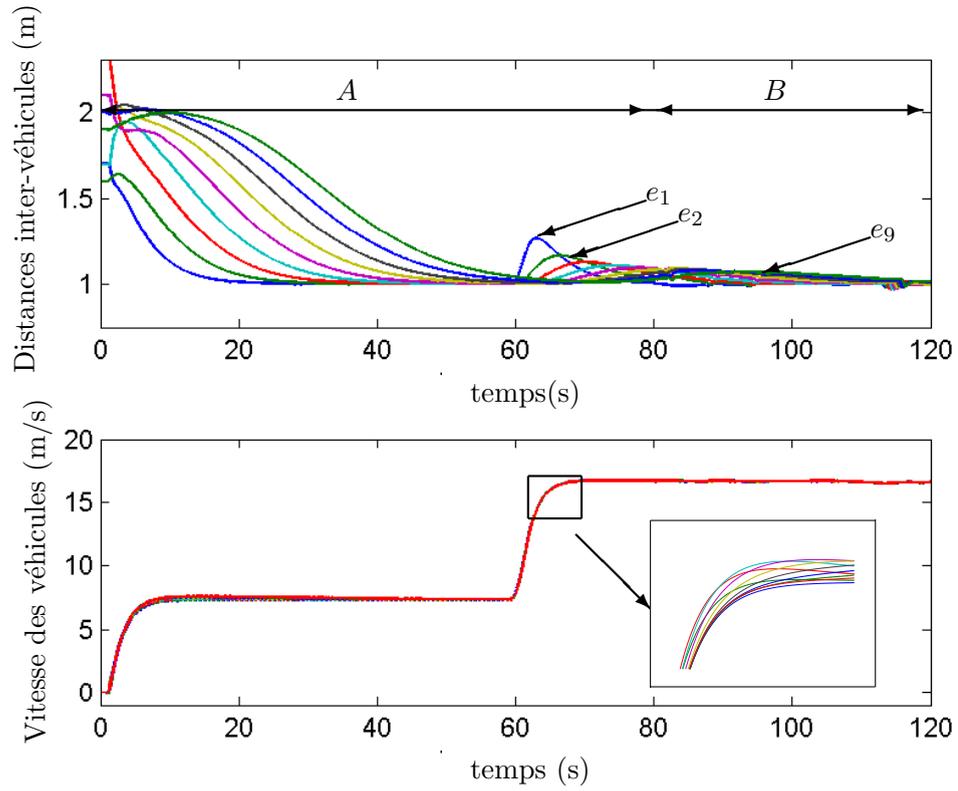


FIGURE 3.34: Les distances inter-véhicules et les vitesses des véhicules (tronçons A, B) pour le deuxième modèle.

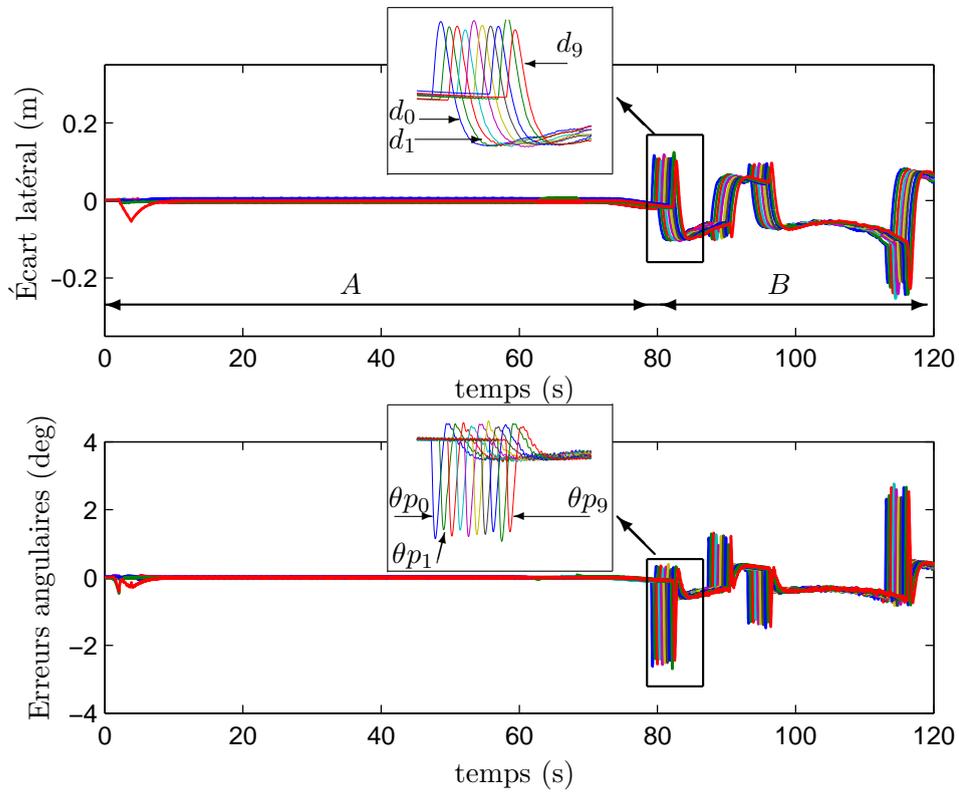


FIGURE 3.35: Les erreurs latérales (angle et écart) (Tronçon A, B) pour le deuxième modèle.

utile car il conduit à des erreurs statiques. De même, il n'est pas très utile de faire le découplage. Dans la suite des simulations, le deuxième modèle sera considéré.

La stabilité du convoi et l'efficacité de la loi de commande, ainsi que le découplage des deux dynamiques vont être vérifiées. La figure (3.34) montre que, dans le tronçon A, le convoi est stable, car l'erreur d'espacement diminue quand elle se propage le long du convoi. De plus, la distance entre les véhicules en régime permanent est égal à la distance désirée l .

Dans la figure (3.35), tronçon B, la commande latérale est stable, et les valeurs maximales de l'erreur angulaire sont inférieures à 3° , et à 25 cm pour l'écart latéral. Dans la figure (3.34), tronçon B, la commande latérale a un faible effet sur l'espacement entre les véhicules (commande longitudinale).

Finalement, les deux commandes sont considérées ensemble dans le tronçon C, où la vitesse du convoi diminue brutalement (freinage brutal), puis la vitesse du convoi est changée. La figure (3.36), montre que le convoi est stable longitudinalement, et la figure (3.37) indique clairement qu'il est stable latéralement.

Mais il est possible de voir que la performance de la commande latérale se dégrade à la fin de l'arrêt d'urgence. Cette dégradation est due à une singularité de la linéarisation autour de $v_i = 0$. Pour éviter cette singularité, une autre commande latérale pour les vitesses faibles doit être utilisée. Dans notre simulation, pour éviter cette singularité, le convoi évolue à vitesse faible à la fin du mode d'arrêt d'urgence. Enfin, il est clair que le convoi est sécurisé (la distance minimum inter-véhicules est plus grande que $0,5\text{ m}$); aucune collision ne se produit lors de l'exécution de l'arrêt d'urgence en passant le chemin C.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les commandes latérale et longitudinale du convoi sont abordées en milieu urbain et sur l'autoroute. Un modèle dynamique a été proposé pour le mouvement longitudinal, et un modèle cinématique pour le mouvement latéral.

Un changement sur la loi de commande classique TCI a été proposée. La nouvelle loi de commande a largement réduit les distances inter-véhicules, sans aucun effet négatif sur la stabilité. Au contraire, il permis d'améliorer la stabilité, d'éviter la saturation du couple de commande et d'augmenter la robustesse de la loi de commande sans grand effet sur les distances inter-véhicules.

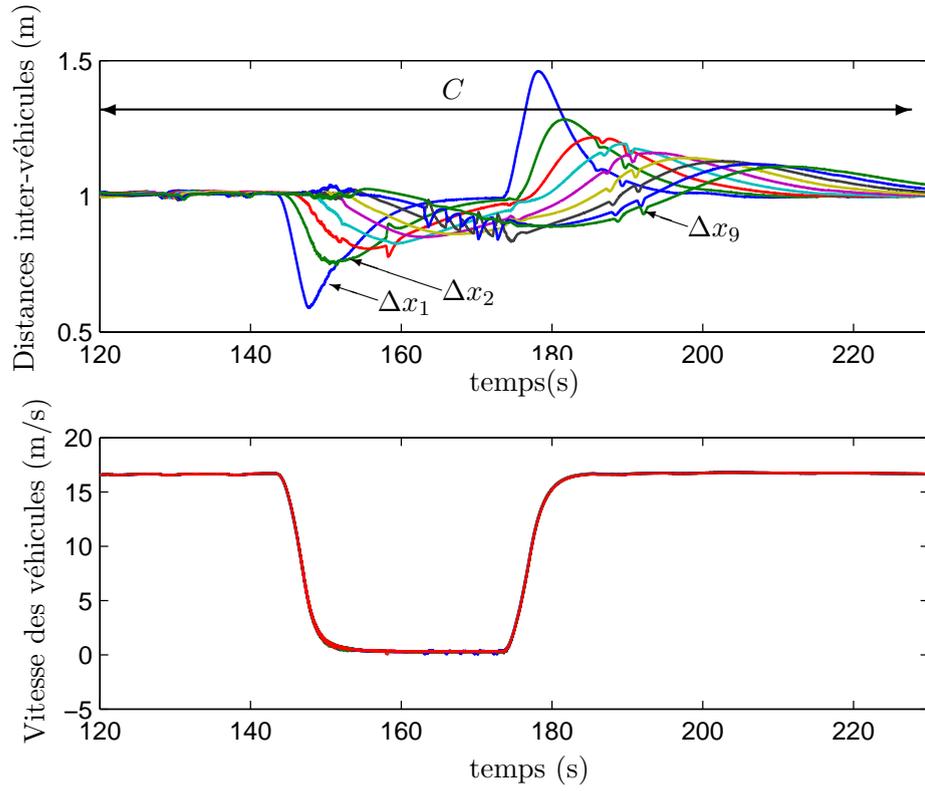


FIGURE 3.36: Les distances inter-véhicules et les vitesses des véhicules dans les phases d'arrêt d'urgence et d'accélération brutale (tronçon C) pour le deuxième modèle.

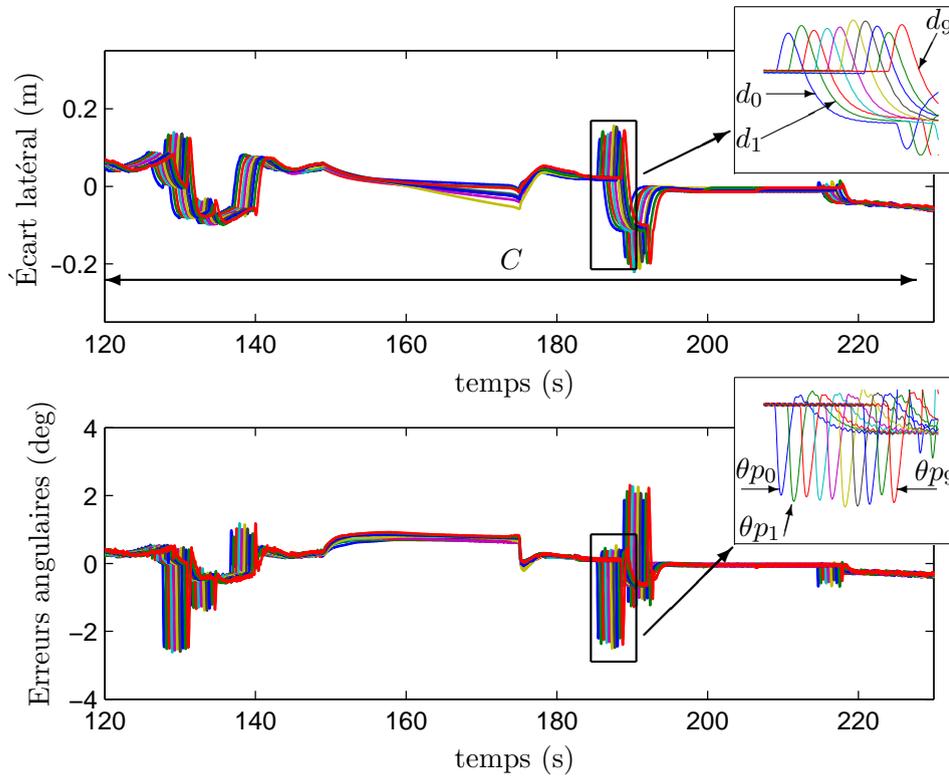


FIGURE 3.37: Les erreurs latérales (angle et écart) dans les phases d'arrêt d'urgence et d'accélération brutale (partie C) pour le deuxième modèle.

La stabilité et la robustesse de cette loi de commande longitudinale pour le convoi a été vérifiée. Les conditions de stabilité ont été trouvées. Une comparaison avec les lois précédentes a été donnée.

Pour le comportement latéral, le modèle linéarisé de la dynamique latérale a été utilisé. Une commande par modes glissants a été développée afin d'assurer la stabilité.

La simulation a été faite sous Matlab et TORCS pour les convois urbains et les convois sur autoroute (tous les résultats montrés dans les figures sont issus de TORCS). Les résultats ont montré l'efficacité de contribution.

Les contributions dans ce chapitre sont :

- une proposition d'une nouvelle loi de commande (CTI modifiée) [6, 7],
- une étude de stabilité et de la sécurité du convoi en utilisant CTI modifiée [6],
- une commande longitudinale et latérale pour les convois urbains [2, 5],

L'étude simple de la robustesse de la nouvelle loi de commande faite dans ce chapitre, en étudiant l'effet du retard du moteur et des capteurs sur la stabilité du convoi homogène (modèle, lois de commande et retards identiques), n'est pas suffisante. Dans le chapitre suivant une étude plus approfondie et plus générale de la robustesse en prenant en compte les effets des retards d'actionneurs, de capteurs et de communication pour un convoi non-homogène, en supposant que les retards ne sont pas identiques a été faites.

Chapitre 4

La robustesse et la sécurité

Les études effectuées dans les chapitres précédents l'ont été sur des modèles de véhicules idéaux sans prise en compte des retards. Ces modèles ne représentent pas les systèmes réels. Les retards qui peuvent apparaître dans les systèmes réels sont non-négligeables et peuvent rendre les systèmes instables ou dangereux s'ils ne sont pas pris en compte. Ces retards peuvent être causés par plusieurs sources comme les actionneurs, les capteurs ou la communication.

Plusieurs études ont été effectuées pour vérifier les effets des retards d'actionnement et de détection sur la stabilité du convoi. Les conditions de stabilité sont trouvées pour plusieurs lois de commande.

D'autres études ont porté sur la stabilité du convoi en ajoutant les retards de communication. Il a été conclu que l'existence du retard de propagation des informations communiquées rend le système instable. Ce résultat semble très négatif puisqu'il rend toutes les lois de commande classiques du convoi instable et donc inutiles. Cependant, les scénarios qui rendent le système non-stable ne sont pas donnés. Une vérification de ces scénarios montre qu'ils ne sont pas réalistes : Il faudrait qu'un véhicule accélère de manière permanente, sans jamais décélérer ni être à vitesse constante.

Dans ce chapitre, les retards dans les modèles des véhicules sont pris en compte. La robustesse et la sécurité des lois de commande, de convois homogènes et non-homogènes en présence de retards qui ne sont pas nécessairement identiques pour tous les véhicules, sont étudiées. Contrairement à ce qui a été obtenu dans la littérature, la stabilité du convoi en présence du retard de propagation de communication est montrée pour des convois réalistes.

4.1 Les retards dans le convoi

4.1.1 Retards de communication

La communication est obligatoire pour la commande d'un convoi homogène avec espacement constant. En même temps, la commande TCI entre véhicules n'est pas très intéressante, bien qu'elle ne nécessite pas de communications, car les distances inter-véhicules sont très grandes. La modification proposée améliore la réponse de cette loi mais nécessite aussi des communications pour fournir la valeur de la vitesse V partagée entre les véhicules. Pour obtenir une densité de trafic élevée, la communication inter-véhicules demeure donc indispensable.

L'utilisation de la communication peut rendre le système instable à cause des retards de communication. Ces retards peuvent être générés par :

- des pertes de paquets,
- le temps de transmission,
- le type d'architecture choisi,

La perte de paquets peut-être due à une puissance de transmission insuffisante, la collision entre données et l'interférence. Si le message communiqué est endommagé, il sera abandonné et traité comme une perte de paquets. L'algorithme de commande va utiliser les dernières données reçues. Ces données ne seront pas mises à jour faute de réception de données valides. Le retard généré par la perte de paquets n'est ni continu, ni systématique ni constant ce qui le rend difficile à étudier. Une étude a été faite dans [91] sur l'effet d'une perte de communication. Il a été prouvé que la stabilité du convoi peut être conservée, avec des erreurs d'espacement bornées, en estimant l'état du leader lors de pertes de données, sans aucune redondance dans les informations communiquées.

Le temps de transmission est le temps nécessaire pour envoyer les informations sur le réseau. Ce temps peut être défini par le débit de transmission (débit binaire) choisi.

Les retards associés à l'architecture de communication sont constitués de la période de temps où les données transmises doivent attendre dans une mémoire tampon avant d'être utilisées dans la boucle de commande.

Le deux dernières causes sont systématiques et peuvent être estimées. Usuellement, le temps de transmission est négligeable par rapport au retard associé à l'architecture de communication.

4.1.2 Retards des actionneurs et capteurs

D'autres retards peuvent être introduits dans les systèmes physiques par les actionneurs et les capteurs. Ces retards parasites ne peuvent pas être ignorés et ils représentent des propriétés naturelles des capteurs et actionneurs. Il existe de nombreuses sources qui produisent ces retards parasites [31, 125] :

1. le retard de l'accélérateur,
2. le retard dans la réponse du moteur et du système mécanique (système de transmission...),
3. le retard de l'actionneur de frein,
4. le temps de réponse des capteurs,
5. le temps de calcul ou de filtrage...

ce qui fait que le couple net du moteur n'est pas immédiatement égal au couple souhaité calculé par la commande.

Ces retards peuvent également avoir des effets importants sur la stabilité s'ils ne sont pas pris en compte. Des conditions de stabilité pour de nombreuses lois de commande, en présence de retards d'actionnement et de capteurs, peuvent être trouvées dans [105, 106, 125, 138, 139]. Une étude simple a été faite dans [106] sur l'effet des retards d'actionneurs et de capteurs sur la commande TCI d'un convoi homogène. Une étude plus détaillée pour les convois homogènes et hétérogènes se trouve dans [125]. Les conditions de stabilité ont été trouvées mais les désavantages de cette loi de commande la rende peu intéressante malgré sa robustesse.

Dans [139] la stabilité du convoi a été étudié pour les cas leader-prédécesseur, prédécesseur-successeur et plusieurs-prédécesseurs, en présence de retards d'actionnement, des capteurs et de communication, et en utilisant une loi de commande avec une distance constante. Mais ce travail fait l'hypothèse de **retards identiques**, pour tous les voitures, sur les informations envoyées par le leader. Cette hypothèse facilite la preuve de stabilité mais n'est pas très réaliste. Les conditions de stabilité ont été trouvées pour les deux premiers cas mais le troisième ne peut pas être stable en présence de retards.

Une étude plus détaillée et plus générale a été faite dans [1] sur l'effet des retards de communication sur la stabilité du convoi. Dans cette étude, les retards des informations du leader peuvent différer d'un véhicule à l'autre. Il a été montré que le convoi devient instable pour *tous les retards de propagation* dans les informations communiquées

par le leader. Ce résultat a été obtenu par le calcul de l'amplitude de la fonction de transfert d'erreur de communication. L'amplitude de cette fonction diverge vers l'infini aux basses fréquences. Pratiquement, cette preuve représente une sur-contrainte car le seul scénario qui provoque cette instabilité est l'application une accélération continue sans décélération. Une tentative pour résoudre ce problème a été proposée dans [140] en synchronisant tous les véhicules, en mettant à jour tous les contrôleurs en même temps et en utilisant les mêmes informations du leader. Mais les effets de fluctuation de l'horloge, qui peuvent être considérés comme des délais et donc peuvent provoquer l'instabilité selon les résultats de [1], n'ont été que brièvement mentionnés.

Dans [141] les auteurs ont essayé de montrer la stabilité du convoi en présence de tous les retards. Ils ont *constaté* que les deux politiques (espacement constant, TCI) sont stables pour un petit convoi, en supposant que les retards de communication sont les mêmes pour toutes les voitures. Mais pour de longs convois, ils ont supposé que les retards de communication entre véhicules ne sont pas égaux au retard de communication du leader. Les auteurs ont essayé de montrer que la commande avec distance constante n'est pas stable et que la commande TCI est stable. Malheureusement, la condition utilisée n'est pas suffisante pour montrer la stabilité; cette preuve n'est donc pas concluante.

Dans cette thèse, il est montré que, **contrairement** à ce qui est affirmé dans [1], qu'il est possible de prouver la stabilité et la sécurité pour les lois d'espacement constant, TCI classique et TCI modifiée en trouvant une limite supérieure à l'erreur propagée.

4.2 Les systèmes de communication

Les systèmes de communication pour les transports intelligents peuvent être divisés en trois catégories :

- Véhicules – Véhicules (V2V)
- Véhicules – Infrastructure (V2I),(I2V)
- Infrastructure – Infrastructure (I2I).

Il y a plusieurs systèmes de communication. Chaque système a des avantages et des inconvénients, selon la technologie utilisée, qui définit la distance maximale, les interférences possibles entre les unités, la vitesse de transmission et la nécessité de vis-à-vis.

Les radios infrarouges ne peuvent être utilisées que pour la communication en vis-à-vis. Les émetteurs-récepteurs infrarouges sont placés sur l'avant et l'arrière d'un véhicule, et

utilisables pour des distances courtes. L'avantage d'utiliser ce système est que chaque canal est unique pour une paire de véhicules, ce qui réduit les risques d'interférences. Les interférences sont un facteur important dans le choix d'un système de communication. Elles constituent la cause principale de perte de paquets ou de la perte totale de communication. Le problème de l'utilisation de ce type de système pour les convois est le processus d'envoi des informations d'un véhicule à un autre véhicule qui n'est pas situé directement devant ou derrière de celui-ci. Donc l'information du leader (et aussi les commandes) doit être relayée et passée par tous les véhicules situés devant, ce qui ajoute des retards et peut réduire la robustesse. La vitesse maximale de communication de ce système est de 1,23 mégabits par seconde.

Les systèmes de communication en utilisant un laser sont aussi de système de ligne de visée, permettant de transmettre des informations entre véhicules adjacents. Il peut transmettre les informations dans les deux directions. Dans [142] un système de ce type est utilisé. Ce système est un système de communication à sens unique du véhicule A au véhicule B. Les avantages de ce type de système sont :

- la robustesse contre les interférences,
- utilisation comme un télémètre.

Les systèmes basés sur la radio : contrairement aux systèmes de communication qui utilisent les technologies optiques mentionnés précédemment, ce système ne nécessite pas de vis-à-vis, mais l'utilisation de la radio requiert un certain type de protocole de réseau pour éviter les transmissions simultanées et les interférences entre émetteurs. Un exemple d'un tel système de communication est le "WaveLAN", qui est capable de taux de transfert de données allant jusqu'à 2 mégabits par seconde, et les tests ont montré que les radios peuvent échanger des données de manière fiable jusqu'à 100 mètres.

Les systèmes de diffusion sont préférables aux systèmes à ligne de visée pour fournir rapidement des informations à un grand nombre de véhicules, mais deviennent moins efficaces lorsque de nombreux véhicules se partagent un seul canal. Les systèmes à ligne de visée sont idéaux pour la transmission d'informations entre véhicules adjacents, car il n'y a aucun conflit sur le canal.

4.3 Étude de la robustesse et de la sécurité de la loi de commande

Pour vérifier la stabilité et la sécurité du convoi en présence de retards d'actionneur, de capteurs et de communication, il faut étudier la robustesse de la loi de commande aux

retards. Un modèle doit être établi pour le convoi en prenant en compte les retards. Puis la stabilité et la sécurité doivent être étudiées.

Dans cette section, une deuxième modification sur la commande modifiée de TCI est proposée. Ce changement améliore la stabilité du convoi en éliminant la faible stabilité de la TCI aux basses fréquences. Une forme générale de la loi de commande est obtenue, à partir de laquelle les autres lois de commande (la commande à espacements constants, TCI modifiée et TCI classique) peuvent être dérivées.

La **stabilité** et la **sécurité** des convois homogènes [9] et **non-homogènes**, en présence de **retards** parasites et **non-identiques** des actionneurs, des capteurs et de communication (figure 4.1) sont prouvées.

La stabilité et la sécurité pour l'espacement constant, la TCI classique et la TCI modifiée sont obtenues comme des cas particuliers de la loi générale.

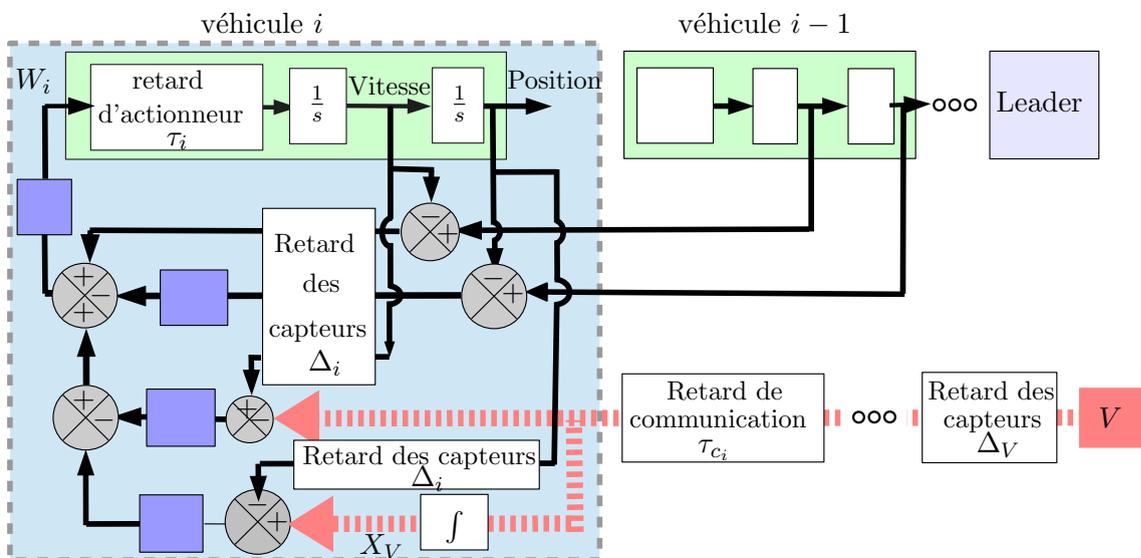


FIGURE 4.1: Schéma de commande de i^{ieme} véhicule avec retards

4.3.1 Le modèle du véhicule en prenant en compte les retards parasites

Les différents modèles de système donnés dans (2.60), (2.63) et (2.58) représentent des modèles idéaux du véhicule. En pratique, un modèle plus représentatif du système, qui prenne en compte les différents retards, doit être élaboré.

Dans la suite, sur la dynamique longitudinale pour un système du deuxième ordre donné par (2.60) sera considérée. Un modèle du système en tenant compte des retards de commande et de détection est proposé dans [125]. Ce modèle est étendu pour tenir compte des délais de communication, ce qui nous donne le modèle de véhicule suivant :

$$\tau_i \ddot{v}_i(t) + \dot{v}_i(t) = W_i(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i}) \quad (4.1)$$

où τ_i , Δ_i , τ_{c_i} et Δ_V sont les retards indiqués dans figure 4.1. τ_i est la combinaison de tous les retards d'actionneur, Δ_i est la combinaison de tous les retards de capteurs, τ_{c_i} est le retard de communication et Δ_V est le retard d'obtention de la vitesse V du camion virtuel. Ce retard peut être égal au retard du capteur de vitesse du leader en choisissant $V = v_l$.

4.3.2 La loi de commande et la dynamique des erreurs

4.3.2.1 Une modification additionnelle sur TCI classique

L'utilisation du camion virtuel dans le nouveau modèle longitudinal a rendu les distances inter-véhicules proportionnelles aux vitesses relatives au lieu d'être proportionnelles aux vitesses absolues [6]. Ceci a amélioré la performance de la commande longitudinale en réduisant la distance nécessaire pour assurer la stabilité du convoi. Ce modèle a été obtenu en changeant la politique TCI classique en soustrayant le même terme V de toutes les vitesses. Une modification supplémentaire est proposée en ajoutant un nouveau terme dans la loi de commande, sous la forme d'une nouvelle force dans le modèle, proportionnelle à l'erreur d'espacement entre le véhicule i et le camion virtuel (figure 2.39).

Dans ce cas, l'erreur d'espacement demeure la même que dans la TCI modifiée déjà donnée dans (3.29) :

$$\delta_i(t) = e_i(t) - h_i (v_i(t) - V(t)), \quad i = 1 \dots N \quad (4.2)$$

mais la loi de commande (3.30) comprend un nouveau terme (figure 4.2) :

$$W_i(t) = \frac{\dot{e}_i(t) + \lambda_i \delta_i(t) + \lambda_{V_i} e_{V_i}(t)}{h_i} \quad i = 1 \dots N \quad (4.3)$$

où V est une valeur de vitesse commune partagée par tous les véhicules du convoi, qui doit avoir la même valeur pour tous les véhicules à tout instant d'échantillonnage [6, 7],

N est le nombre de véhicules dans le convoi. e_{V_i} est l'erreur d'espacement entre le (i)-ème véhicule et le camion virtuel. Elle est égale à $e_{V_i} = X_V - x_i - L_{d_i}$, $L_{d_i} = i l + L_V$, L_V est la distance désirée entre le leader et le camion virtuel, X_V est la position du camion virtuel ($X_V = \int V$). Ce nouveau changement rend la loi de commande très similaire par sa forme à la loi d'espacement constant (3.24).

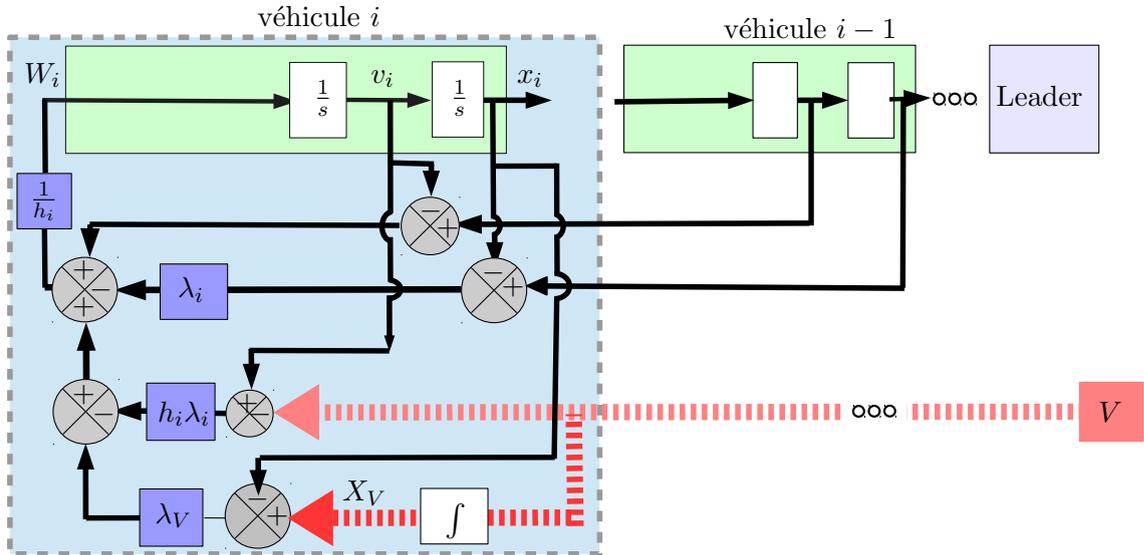


FIGURE 4.2: Schéma de commande du $i^{\text{ème}}$ véhicule avec la nouvelle modification (en rouge)

4.3.2.2 La loi de commande en prenant en compte les retards

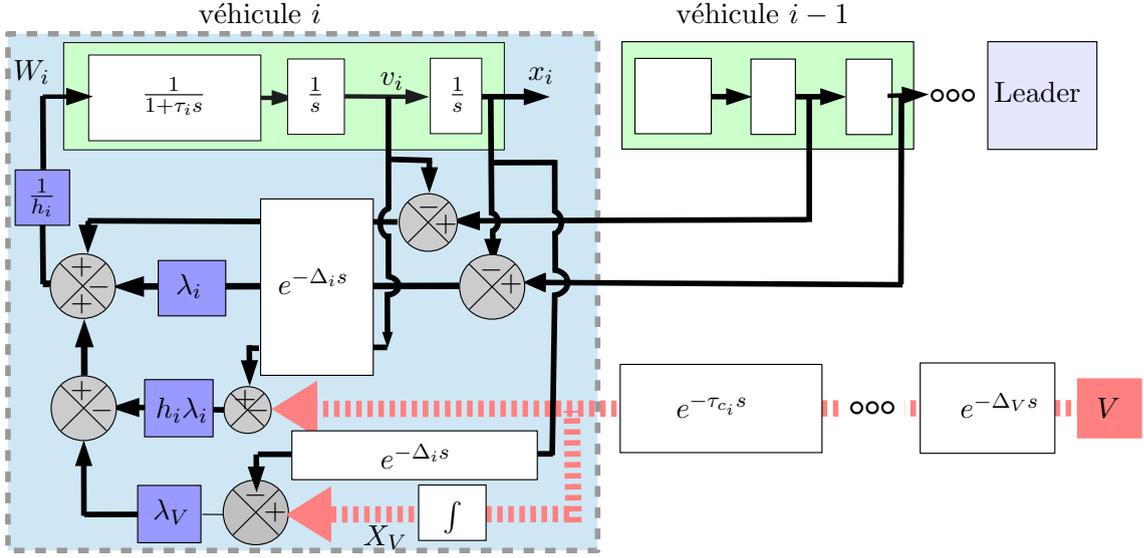
A cause des retards des capteurs et de la communication, les termes dans la loi de commande ne correspondent pas au même instant. Les valeurs des paramètres dépendent du retard des capteurs et aussi, pour les paramètres qui viennent d'autres véhicules, du temps nécessaire pour les envoyer par un système de communication (figure 4.3).

La loi de commande (4.3) prend la forme suivante pour $1 \leq i \leq N$:

$$W_i(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i}) = \frac{\dot{e}_i(t - \Delta_i) + \lambda_i \delta_i(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i}) + \lambda_{V_i} e_{V_i}(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i})}{h_i} \quad (4.4)$$

où

$$e_{V_i}(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i}) = X_V(t - (\Delta_V + \tau_{c_i})) - x_i(t - \Delta_i) - L_{d_i} \quad (4.5)$$


 FIGURE 4.3: Schéma de commande du $i^{\text{ème}}$ véhicule avec retard

et

$$\delta_i(t, \Delta_V, \Delta_i, \tau_{c_i}) = e_i(t - \Delta_i) - h_i[v_i(t - \Delta_i) - V(t - (\Delta_V + \tau_{c_i}))] \quad (4.6)$$

Sans perte de généralité, il est possible de supposer que, pour tout valeur de i , $v_i(0) = 0$, $a_i(0) = 0$, $\delta_i(0) = 0$. L'utilisation (4.1) et (4.4) peut être établie la dynamique de l'erreur d'espacement e_i pour $2 \leq i \leq N$.

$$\begin{aligned} & \tau_i h_i \ddot{e}_i(t) + h_i \ddot{e}_i(t) + (1 + \lambda_i h_i) \dot{e}_i(t - \Delta_i) + (\lambda_i + \lambda_{V_i}) e_i(t - \Delta_i) = \\ & \frac{h_i}{h_{i-1}} (\dot{e}_{i-1}(t - \Delta_{i-1}) + \frac{\lambda_{i-1}}{h_{i-1}} e_{i-1}(t - \Delta_{i-1})) + h_i (\tau_i - \tau_{i-1}) \ddot{x}_{i-1}(t) + \\ & h_i [\lambda_i v_{i-1}(t - \Delta_i) - \lambda_{i-1} v_{i-1}(t - \Delta_{i-1})] + \frac{1}{h_{i-1}} [\lambda_{V_i} h_{i-1} x_i(t - \Delta_i) - \lambda_{V_{i-1}} h_i x_i(t - \Delta_{i-1})] + \\ & h_i [\lambda_{i-1} V(t - (\Delta_V - \tau_{c_{i-1}})) - \lambda_i V(t - (\Delta_V - \tau_{c_i}))] + \frac{1}{h_{i-1}} [\lambda_{V_{i-1}} h_i X_V(t - (\Delta_V - \tau_{c_{i-1}})) \\ & - \lambda_{V_i} h_{i-1} X_V(t - (\Delta_V - \tau_{c_i}))] \end{aligned} \quad (4.7)$$

En appliquant la transformation de Laplace, il vient :

$$E_i(s) = G_{e_i} E_{i-1}(s) + G_{J_i} J_{i-1}(s) + G_{a_i} A_{i-1}(s) + G_{v_i} V_{i-1}(s) + G_{A_{V_i}} A_V(s) + G_{V_i} V(s) \quad (4.8)$$

où $E_{i-1}(s), J_{i-1}(s), A_{i-1}(s), V_{i-1}(s), A_V(s), V(s)$ sont les transformées de Laplace des fonctions $e_{i-1}(t), \ddot{x}_{i-1}(t), a_{i-1}(t), v_{i-1}(t), a_V(t), V(t)$ respectivement, $\ddot{x}_{i-1}(t)$ est l'à-coup du $(i-1)$ -ème véhicule et $a_V(t)$ est l'accélération du camion.

$$\begin{aligned} G_{e_i} &= G_{e_i}(s) = \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{(s + \lambda_{i-1}) e^{-\Delta_{i-1}s}}{\zeta_i(s)} \\ G_{J_i} &= G_{J_i}(s) = h_i \frac{(\tau_i - \tau_{i-1})}{\zeta_i(s)} \\ G_{a_i} &= G_{a_i}(s) = h_i \frac{\lambda_i e^{-\Delta_i s} - \lambda_{i-1} e^{-\Delta_{i-1}s}}{s \zeta_i(s)} \\ G_{v_i} &= G_{v_i}(s) = \frac{(\lambda_{V_i} h_{i-1} - \lambda_{V_{i-1}} h_i) e^{-\Delta_{i-1}s}}{h_{i-1} s \zeta_i(s)} \\ G_{A_{V_i}} &= G_{A_{V_i}}(s) = h_i \frac{(\lambda_{i-1} e^{-\tau_{c_{i-1}} s} - \lambda_i e^{-\tau_{c_i} s}) e^{-\Delta_V s}}{s \zeta_i(s)} \\ G_{V_i} &= G_{V_i}(s) = \frac{(\lambda_{V_{i-1}} h_i e^{-\tau_{c_{i-1}} s} - \lambda_{V_i} h_{i-1} e^{-\tau_{c_i} s}) e^{-\Delta_V s}}{h_{i-1} s \zeta_i(s)} \end{aligned} \quad (4.9)$$

où $\zeta_i(s) = \tau_i h_i s^3 + h_i s^2 + ((1 + \lambda_i h_i) s + \lambda_i + \lambda_{V_i}) e^{-\Delta_i s}$.

Il est clair dans (4.8) que la présence de retards dans un convoi non-homogène fait que l'erreur du i -ème véhicule est non seulement une fonction de e_{i-1} , mais aussi de la vitesse partagée $V(t)$ et de l'accélération du camion $a_V(t)$, en plus de l'à-coup $\ddot{x}_{i-1}(t)$, l'accélération $a_{i-1}(t)$ et la vitesse du $(i-1)$ ème véhicule.

Pour simplifier, $\Delta_{c_i} = \tau_{c_{i-1}} - \tau_{c_i}$ est introduit comme le retard de propagation entre le i -ème et le $(i-1)$ -ème véhicule. En plus, $\Delta_{\tau_i} = \tau_{i-1} - \tau_i$ est défini.

La dynamique de la première erreur d'espacement e_1 est différente de la dynamique des autres véhicules. Elle peut être calculée en utilisant (4.1) et (4.4) et en ajoutant $(\tau_1 h_1 \ddot{v}_0(t) + h_1 \dot{v}_0(t) + \lambda_1 h_1 v_0(t - \Delta_1) + \lambda_{V_1} x_0(t - \Delta_1))$ à gauche et à droite de (4.4), la dynamique de la première erreur d'espacement peut être obtenue comme une fonction de x_0, v_0 la position et la vitesse du leader, en plus de la position et de la vitesse du camion. Puis, en ajoutant $(\tau_1 h_1 \ddot{V}(t) + h_1 \dot{V}(t) + \lambda_1 h_1 V(t - \Delta_1) + \lambda_{V_1} X_V(t - \Delta_1))$ à gauche et à droite de l'équation obtenue, il vient :

$$\begin{aligned}
& \tau_1 h_1 \ddot{e}_1(t) + h_1 \ddot{e}_1(t) + (1 + \lambda_1 h_1) \dot{e}_1(t - \Delta_1) + (\lambda_1 + \lambda_{V_1}) e_1(t - \Delta_1) = \\
& -\tau_1 h_1 \ddot{e}_V(t) - h_1 \ddot{e}_V(t) - \lambda_1 h_1 \dot{e}_V(t - \Delta_1) - \lambda_{V_1} e_V(t - \Delta_1) + \tau_1 h_1 \ddot{V}(t) + h_1 \dot{V}(t) + \\
& \lambda_1 h_1 [V(t - \Delta_1) - V(t - (\Delta_V + \tau_{c_1}))] + \lambda_{V_1} [X_V(t - \Delta_1) - X_V(t - (\Delta_V + \tau_{c_1}))]
\end{aligned} \tag{4.10}$$

En calculant la transformée de Laplace, il vient :

$$E_1(s) = -K_{\dot{e}_V}(s)EP_{V_0}(s) - K_{e_V}(s)E_{V_0}(s) + K_{A_V}(s)A_V(s) + K_{V_p}(s)V(s) \tag{4.11}$$

où $E_{V_0}(s)$, $EP_{V_0}(s)$, $A_V(s)$ sont les transformées de Laplace de l'erreur d'espace entre le leader et le camion virtuel $e_{V_0}(t) = X_V(t) - x_0(t) - L_V$, $\dot{e}_{V_0}(t)$ la dérivée de l'erreur d'espace et $a_V(t)$ l'accélération du camion virtuel respectivement.

$$\begin{aligned}
K_{\dot{e}_V} &= h_1 \frac{\tau_1 s^2 + s + \lambda_1 e^{-\Delta_1 s}}{\zeta_1(s)}, K_{e_V} = \frac{\lambda_{V_1} e^{-\Delta_1 s}}{\zeta_1(s)} \\
K_{V_p} &= \frac{(\lambda_1 h_1 s + \lambda_{V_1}) e^{-\Delta_1 s} (1 - e^{-((\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1} s)})}{s \zeta_1(s)}, \\
K_{A_V} &= h_1 \frac{\tau_1 s + 1}{\zeta_1(s)}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Donc, la forme de la loi de commande (4.4) est obtenue en prenant en compte les retards d'actionnement, de détection et de communication. La dynamique des erreurs (4.7) et la dynamique de la première erreur (4.10) sont également établies.

4.3.3 Stabilité de la loi de commande en présence de retards

Selon la définition de la stabilité donnée dans (3.2), pour vérifier la stabilité du convoi il faut trouver une limite supérieure pour l'erreur, ce qui garantit que les erreurs ne tendent pas vers l'infini. Il sera donc nécessaire de trouver une limite supérieure pour l'erreur du i -ème véhicule, puis de calculer cette limite quand $i \rightarrow \infty$.

Il faut commencer par calculer la première erreur. En prenant la dynamique d'erreur donnée dans (4.11) et en utilisant le rappel (A.2) et (A.3) pour des fonctions impulsion positive $k_{\dot{e}_V}(t)$, $k_{e_V}(t)$, $k_{a_V}(t)$, $k_{V_p}(t)$, il vient :

$$\|e_1(t)\|_\infty \leq K_{\dot{e}_V}^* \max |\dot{e}_V(t)| + K_{e_V}^* \max |e_V(t)| + K_{A_V}^* \max |a_V(t)| + K_{V_p}^* \max |V(t)| \quad (4.13)$$

Rappelant que pour une fonction de transfert $G_i(s)$, G_i^* est défini comme suite : $G_i^* = \|G_i(\omega)\|_\infty$, et $G^* = \max_i (\|G_i(\omega)\|_\infty)$.

D'après l'annexe (B.6), $K_{\dot{e}_V}^*$, $K_{e_V}^*$ et $K_{A_V}^*$ sont bornés parce que :

- 1- la norme de leur dénominateur ne peut pas s'annuler,
- 2- Dans les hautes fréquences, bien que le numérateur tende vers l'infini, la norme de ces fonctions de transfert tend vers zéro.

Les mêmes arguments que précédemment s'appliquent à $K_{V_p}^*$, sauf aux basses fréquences. La norme est encore bornée en calculant sa valeur en utilisant la série de Taylor autour de la fréquence nulle, ce qui est présenté à l'annexe (B.16).

Ainsi, la première erreur est bornée si l'accélération et la vitesse du camion virtuel sont bornées, et si l'erreur d'espacement et l'erreur de vitesse entre le camion virtuel et le leader sont bornées. Cela impose des conditions sur la commande du leader et la dynamique du camion virtuel, qui semble raisonnable d'un point de vue applicatif.

Pour vérifier les bornes de la i -ème erreur, où $i = 2 \dots N$, nous utilisons (4.8) et (4.11) pour calculer la relation entre e_i et e_1 . Il vient :

$$\begin{aligned} E_i(s) = & \prod_{j=2}^i G_{e_j} E_1(s) + \sum_{j=1}^{i-1} G_{J_{j+1}} \prod_{k=j+2}^i G_{e_k} J_j(s) + \sum_{j=1}^{i-1} G_{a_{j+1}} \prod_{k=j+2}^i G_{e_k} A_j(s) + \\ & \sum_{j=1}^{i-1} G_{v_{j+1}} \prod_{k=j+2}^i G_{e_k} V_j(s) + \sum_{j=1}^{i-1} G_{A_{V_{j+1}}} \prod_{k=j+2}^i G_{e_k} A_V(s) + \sum_{j=1}^{i-1} G_{V_{j+1}} \prod_{k=j+2}^i G_{e_k} V(s) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Supposons que $g_e(t)$, $g_J(t)$, $g_a(t)$, $g_v(t)$, $g_{A_V}(t)$, $g_V(t)$ sont les fonctions impulsionnelles de $G_e(s)$, $G_J(s)$, $G_a(s)$, $G_v(s)$, $G_{A_V}(s)$, $G_V(s)$ respectivement. Pour $(g_e(t), g_J(t), g_a(t), g_v(t), g_{A_V}(t), g_V(t))$ positives et en utilisant (A.2, A.3), il vient :

$$\begin{aligned} \|e_i(t)\|_\infty &\leq (G_e^*)^{i-2} \|e_1(t)\|_\infty + G_J^* \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} \|J_j(t)\|_\infty + G_a^* \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} \|a_j(t)\|_\infty + \\ &G_v^* \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} \|v_i(t)\|_\infty + G_{A_V}^* \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} \|a_V(t)\|_\infty + G_V^* \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} \|V(t)\|_\infty \end{aligned} \quad (4.15)$$

Pratiquement, la vitesse maximale est $v_{max} = \max_i \|v_i(t)\|_\infty$, les accélérations et décélérations maximales sont $a_{max} = \max_i \|a_i(t)\|_\infty$, l'à-coup maximum est $J_{max} = \max_i \|\ddot{x}_i(t)\|_\infty$ et $V_{max} = \|V(t)\|_\infty$, $a_{V_{max}} = \|a_V(t)\|_\infty$ sont la vitesse maximale et l'accélération (ou décélération) du camion virtuel, respectivement. Par conséquence, il vient :

$$\begin{aligned} \|e_i(t)\|_\infty &\leq (G_e^*)^{i-2} \|e_1(t)\|_\infty + \\ &\rho_i [G_J^* J_{max} + G_a^* a_{max} + G_v^* v_{max} + G_{A_V}^* a_{V_{max}} + G_V^* V_{max}] \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\text{où } \rho_i = \sum_{j=2}^i (G_e^*)^{i-j} = \frac{1-(G_e^*)^{i-2}}{1-G_e^*}$$

Pour s'assurer que le premier terme est borné, il est suffisant d'imposer $G_e^* < 1$ car il a déjà été prouvé dans (4.13) que $\|e_1(t)\|_\infty$ est bornée. La condition $G_e^* < 1$ peut être assurée en satisfaisant les conditions suffisantes suivantes pour $i = 2 \dots N$, (annexe (B.5)).

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i < \frac{h_i - 2(\Delta_i + \tau_i) - 2\lambda_{V_i} \tau_i \Delta_i}{2(h_i(\Delta_i + \tau_i) - \Delta_i \tau_i)} \text{ et } \lambda_i > \frac{\lambda_{V_i} \tau_i - 1}{h_i - \tau_i} \text{ et} \\ h_i > 2(\Delta_i + \tau_i) + 2\lambda_{V_i} \tau_i \Delta_i \text{ et } \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} < 1 \text{ et } \lambda_{i-1}^2 > \frac{(\lambda_i + \lambda_{V_i})^2}{\lambda_i^2 h_i^2 - 2\lambda_{V_i} h_i + 1} \end{array} \right\} \quad (4.17)$$

En fait, une condition moins stricte peut être suffisante pour assurer que le premier terme est borné en prenant $\prod_{j=2}^i G_{e_j} \leq \epsilon$ où $\epsilon < \infty$. Mais dans ce cas, il n'est pas facile de trouver les conditions de sécurité donc elle n'est pas utilisée.

$\|\rho_i\|_\infty$ est bornée parce que le numérateur est toujours borné, et son dénominateur ne peut pas être nul car $G_{e_i}^* < 1$.

Pour les autres fonctions de transfert G_J^* , G_a^* , G_v^* , $G_{A_V}^*$ et G_V^* , leurs normes deviennent nulles à des fréquences élevées. Pour les autres fréquences G_J^* est borné parce que son dénominateur ne peut pas s'annuler, comme il est prouvé dans (B.6). Au contraire un

problème apparaît lorsque le dénominateur de G_a^* , G_v^* , G_{AV}^* et G_V^* tend vers zéro aux fréquences basses, car la norme tend vers l'infini. Pour $\|G_{v_i}(\omega)\|$ et $\|G_{V_i}(\omega)\|$ cela peut être évité en prenant :

$$\frac{\lambda_{V_i}}{h_i} = \frac{\lambda_{V_{i-1}}}{h_{i-1}} \quad i = 2 \dots N \quad (4.18)$$

ce qui donne $\|G_{v_i}(\omega)\| = 0$ et annule l'effet de $V(s)$ sur l'erreur, ainsi que $\|G_{V_i}(\omega)\| < \|G_{V_i}(0)\| = \frac{\lambda}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} \Delta_{c_i}$ comme il a été prouvé dans (B.13). Donc $\|G_{V_i}(\omega)\|$ est borné si les conditions (4.18) et

$$|\Delta_{c_i}| < \infty \quad i = 2 \dots N \quad (4.19)$$

sont assurées.

Avec la même technique le même problème peut être évité pour $\|G_{a_i}(\omega)\|$ et $\|G_{AV_i}(\omega)\|$ en prenant :

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} \quad i = 2 \dots N \quad (4.20)$$

Ces conditions rendent la norme des deux fonctions de transfert égale à (B.9) et (B.14), comme montré en l'annexe (B). Ces termes sont bornés si (4.20) et

$$|\Delta_i - \Delta_{i-1}| < \infty \quad i = 2 \dots N \quad (4.21)$$

sont assurés.

Finalement, l'erreur de distance peut être bornée, par conséquent il est possible d'assurer la stabilité du convoi non-homogène, en présence de retards non-homogènes, en imposant les conditions suffisantes exprimées par (4.17), (4.18), (4.19), (4.20) et (4.21).

4.3.4 Sécurité de la loi de commande en présence de retards

Pour assurer la sécurité du convoi, il convient de s'assurer que l'erreur maximale est inférieure à la distance désirée, $\max(e_i(t)) < l$, ce qui garantit que $x_{i-1} - x_i > 0$ et qu'il n'y a pas de collision. Sans perte de généralité, il convient de prendre $a_{V_{max}} = a_{max}$ et $v_{max} = V_{max}$.

Pour le premier véhicule, il a été établie dans (4.13) que l'erreur est bornée. Pour s'assurer que $|e_1(t)| \leq l$, il suffit de s'assurer que :

$$\|e_1(t)\|_\infty \leq K_{\dot{e}_V}^* \max |\dot{e}_V(t)| + K_{e_V}^* \max |e_V(t)| + K_{A_V}^* a_{V_{max}} + K_{V_p}^* V_{max} \leq l \quad (4.22)$$

De (4.22) et en utilisant les résultats des annexes (B.16), (B.19), (B.20) et (B.25) les conditions de sécurité pour la première erreur sont obtenues :

$$|(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}| \leq \frac{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}{\lambda_{V_1} V_{max}} \left(l - \frac{\lambda_1 h_1 \max |\dot{e}_V| + \lambda_{V_1} \max |e_V| + h_1 a_{V_{max}}}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} \right) \quad (4.23)$$

La quantité $|(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}|$ est toujours ≥ 0 ce qui impose des conditions supplémentaires pour garantir cette inégalité il convient de s'assurer que le côté droit de (4.23) est toujours positif. Il vient :

$$h_1 \leq \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1}) l - \lambda_{V_1} \max |e_V|}{\lambda_1 \max |\dot{e}_V| + a_{V_{max}}} \quad (4.24)$$

Pour les autres erreurs, de (4.8) et pour les fonctions de transfert $G_{e_i}(s)$, $G_{J_i}(s)$, $G_{a_i}(s)$, $G_{A_{V_i}}(s)$, $G_{V_i}(s)$ avec des fonctions impulsives positives $g_{e_i}(t)$, $g_{J_i}(t)$, $g_{a_i}(t)$, $g_{A_{V_i}}(t)$, $g_{V_i}(t)$, selon (A.2) et (A.3) les équations suivantes peuvent être obtenues :

$$\begin{aligned} \|e_i(t)\|_\infty \leq G_{e_i}^* \|e_{i-1}(t)\|_\infty + G_{J_i}^* \|J_i(t)\|_\infty + G_{a_i}^* \|a_i(t)\|_\infty + G_{v_i}^* \|v_i(t)\|_\infty + \\ G_{A_{V_i}}^* \|A_{V_i}(t)\|_\infty + G_{V_i}^* \|V(t)\|_\infty \quad \text{pour } i = 2 \dots N \end{aligned} \quad (4.25)$$

Pour un convoi sécurisé constitué de $i - 1$ véhicules l'erreur est toujours inférieure à la distance désirée $\|e_j\|_\infty < l$, $j = 1 \dots i - 1$. Puis, à partir de (4.25) et de l'hypothèse précédente, pour assurer la stabilité lorsque l' i -ème véhicule est ajoutée, il suffit de satisfaire la condition suivante :

$$G_{e_i}^* l + G_{J_i}^* J_{max} + G_{a_i}^* a_{max} + G_{v_i}^* v_{max} + G_{AV_i}^* a_{V_{max}} + G_{V_i}^* V_{max} < l \quad (4.26)$$

Donc la condition de sécurité pour $i = 2 \dots N$ est donnée par :

$$h_i |\Delta \tau_i| J_{max} + \lambda_i h_i (|\Delta_i - \Delta_{i-1}| + |\Delta_{c_i}|) a_{max} + \lambda_i \Delta_{c_i} V_{max} \leq \frac{\lambda_{V_i} h_{i-1} + \lambda_i (h_{i-1} - h_i)}{h_{i-1}} l \quad (4.27)$$

Donc en choisissant $h_{i-1} \geq h_i$ il est possible de rendre la commande plus robuste aux retards.

En conclusion, les conditions de sécurité pour les convois non-homogènes en tenant compte des différents retards sont données dans (4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.23, 4.24, 4.27), qui s'ajoutent aux conditions données dans les annexes (B.21, B.24).

4.4 Cas particuliers

4.4.1 Espacement constant

Dans [1], Hedrick a prouvé que le convoi devient instable pour **tous les retards de propagation** des informations communiquées par le leader ! mais les situations qui rendent le convoi instable n'ont pas été données. Malgré sa preuve, il a fait des simulations et il a obtenu un convoi stable, en contradiction de la preuve. Sa preuve est due à un gain infini dans la fonction de transfert de l'erreur d'espacement en présence du retard de communication, aux basses fréquences. En pratique, cette preuve représente une sur-contrainte parce que le **seul** scénario qui provoque cette instabilité est lorsqu'une accélération positive est toujours appliquée.

La stratégie d'espacement constant est un cas particulier de la nouvelle loi de commande générale donnée dans (4.3). Donc, il est possible de trouver les conditions suffisantes de

stabilité pour un convoi lors de l'utilisation de la stratégie d'espacement constant en prenant $V = v_0$, $X_V = x_0$ et $e_{V_i} = e_{i_0}$. Ensuite, la seule différence par rapport au modèle général est dans la première dynamique d'erreur, qui devient :

$$E_1(s) = K_{A_V}(s)A_V(s) + K_{V_p}(s)V(s) \quad (4.28)$$

Les conditions de stabilité sont exactement les mêmes que pour le modèle général.

La seule différence avec le cas général est la condition de sécurité pour le premier véhicule. Elle peut être facilement obtenue à partir de (4.23) en faisant $\dot{e}_{V_0} = 0$ et $e_{V_0} = 0$, donc il vient :

$$|(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}| \leq \frac{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}{\lambda_{V_1} V_{max}} \left(l - \frac{h_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} a_{V_{max}} \right) \quad (4.29)$$

$|(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}| \geq 0$ impose les conditions suivantes :

$$h_1 \leq \frac{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}{a_{V_{max}}} l \quad (4.30)$$

La stabilité du convoi, lors de l'utilisation de la stratégie d'espacement constant, peut être obtenue, contrairement à ce qui a été conclu dans [1]. La sécurité est également avérée et les conditions sont données dans (4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.27, 4.29, 4.30), en plus des conditions données dans l'annexe (B.21).

4.4.2 TCI modifiée

Dans ce cas $\lambda_{V_i} = 0$. Donc, il n'est pas nécessaire de connaître la position du camion virtuel.

Les dynamiques des erreurs deviennent :

$$E_i(s) = G_{e_i}(s) E_{i-1}(s) + G_{J_i}(s) J_{i-1}(s) + G_{a_i}(s) A_{i-1}(s) + G_{A_{V_i}}(s) A_V(s) \quad (4.31)$$

La dynamique de la première erreur devient :

$$E_1(s) = -K_{\hat{e}_V}(s)EP_{V_0}(s) + (K_{A_V}(s) + K_{\hat{A}_V}(s))A_V(s) \quad (4.32)$$

où

$$K_{\hat{A}_V} = \frac{\lambda_1 h_1 e^{-\Delta_1 s} (1 - e^{-((\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{e_1})s})}{s \zeta_1(s)} \quad (4.33)$$

Les conditions de stabilité lors de l'utilisation de la TCI modifiée pour $i = 2 \dots N$ s'écrivent alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i < \frac{h_i - 2(\Delta_i + \tau_i)}{2h_i(\Delta_i + \tau_i) - 2\Delta_i\tau_i} \text{ et } \lambda_i > \frac{-1}{h_i - \tau_i} \text{ et} \\ h_i \geq 2(\Delta_i + \tau_i) \text{ et } \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} < 1 \end{array} \right\} \quad (4.34)$$

en plus des conditions (4.20) et (4.21).

La condition $\frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} < 1$ avec la condition (4.20) devient :

$$h_{i-1} > h_i \quad (4.35)$$

Cette condition assure encore que la norme de $\|G_{e_i}(\omega)\|$ ne devient pas égale à 1, quel que soit ω . La faiblesse principale de la TCI modifiée a disparu. Cette faiblesse apparaît, en convoi homogène ($h_i = h_{i-1}$), au voisinage de $\omega = 0$ où $G_{e_i}(\omega)$ a une norme unité, ce qui rend le gain d'erreur égal à 1, et l'amplitude de l'erreur ne diminue pas à long du convoi.

La condition de sécurité pour le premier véhicule se met sous la forme :

$$|(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c1}| \leq \frac{1}{a_{V_{max}}} \left(\frac{l}{h_1} - \max |\dot{e}_V| - \frac{1}{\lambda_1} a_{V_{max}} \right) \quad (4.36)$$

Cela permet d'établir la condition supplémentaire suivante :

$$h_1 \leq \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \max |\dot{e}_V| + a_{V_{max}}} l \quad (4.37)$$

La condition de sécurité pour le i -ème véhicule ($i = 2 \dots N$) devient :

$$|\Delta \tau_i| J_{max} + \lambda_i (|\Delta_i - \Delta_{i-1}| + |\Delta_{c_i}|) a_{max} \leq \frac{\lambda_{V_i} h_{i-1} + \lambda_i (h_{i-1} - h_i)}{h_{i-1} h_i} l \quad (4.38)$$

(4.35) rend le membre de droite (4.38) toujours positif, ce qui augmente la robustesse du système en présence de retards.

Donc, les conditions de sécurité pour un convoi non-homogène en tenant compte des différents retards et en utilisant la loi TCI modifiée sont données par (4.20, 4.21, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38), en plus des conditions données dans les annexes (B.21, B.24).

4.4.3 TCI classique

Dans ce cas, λ_{V_i} est fixé tel que $\lambda_{V_i} = 0$ et $V = 0$. La dynamique de la i -ème erreur devient :

$$E_i(s) = G_{e_i} E_{i-1}(s) + G_{J_i} J_{i-1}(s) + G_{a_i} A_{i-1}(s) \quad (4.39)$$

La dynamique de la première erreur s'écrit :

$$E_1(s) = K_{\dot{e}_V}(s) V_0(s) \quad (4.40)$$

Les conditions de stabilité sont données dans (4.34). La condition $\frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} < 1$ permet aussi d'éviter la faiblesse de la loi TCI aux basses fréquences (déjà mentionné pour TCI modifiée) lorsque $\|G_{e_i}\|$ devient égal à 1.

La condition de sécurité pour le premier véhicule devient :

$$h_1 \leq \frac{l}{V_{max}} \quad (4.41)$$

Et pour les autres véhicules ($i = 2 \dots N$) :

$$|\Delta\tau_i|J_{max} + 2\lambda_i|\Delta_i - \Delta_{i-1}|a_{max} \leq \lambda_i \frac{(h_{i-1} - h_i)}{h_{i-1} h_i} l \quad (4.42)$$

De la dernière condition, pour obtenir la sécurité en présence de retards d'actionnement et de détection, il est nécessaire de diminuer h_i le long du convoi :

$$h_{i-1} > h_i \quad (4.43)$$

Donc, les conditions de sécurité pour un convoi non-homogène en tenant compte des différents retards et en utilisant la loi TCI classique sont données par (4.20, 4.21, 4.34, 4.41, 4.43, 4.42) en plus de la condition donnée dans l'annexe (B.24).

En conclusion, les conditions de stabilité et de sécurité ont été élaborées pour les convois en présence de retards non-homogènes en utilisant des commandes non-homogènes pour les véhicules. Les conditions sont trouvées pour les cas les plus graves et il s'agit de conditions suffisantes, mais pas nécessaires. Les mêmes résultats ont été obtenus pour les trois cas particuliers importants.

4.5 SIMULATIONS

Une simulation a été effectuée à l'aide de Matlab. Un convoi composé de 10 véhicules a été créé. La distance désirée entre véhicule est de $l = 12 \text{ m}$ (la sécurité est calculée pour $l = 10 \text{ m}$ à laquelle est ajoutée une marge de sécurité supplémentaire). Le convoi a des

retards non-homogènes. Les retards d'actionnement, de détection et de communication sont indiqués dans le tableau (4.1).

Des paramètres de commande non-homogènes sont également donnés dans le tableau (4.1) concernant les conditions de stabilité et de sécurité. Les accélérations/ décélérations maximales sont fixées égales à $\mp 5 \text{ m.s}^{-2}$, ce qui est au-delà de l'accélération de confort et dépasse également la capacité de la plupart des véhicules.

La stabilité et la sécurité ont été vérifiées dans certains scénarios critiques importants. Ces scénarios sont :

- création du convoi (le leader accélère de 0 à 30 *km/h*),
- changement de vitesse avec une accélération maximale (de 30 à 150 *km/h*),
- circulation à vitesse maximale,
- freinage brutal.

Ces scénarios permettent de vérifier la validité de la stabilité et de la sécurité dans les conditions limites.

Sur la figure (4.4), le convoi effectue la manœuvre de création sans problème et que les distances inter-véhicules se stabilisent à des valeurs proches de la distance souhaitée. Il y a une erreur statique. Cette erreur est due aux retards de communication et de détection. Elle est proportionnelle à la vitesse et aux retards.

Dans la deuxième étape, le système accélère avec l'accélération maximale jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse maximale sans perdre la stabilité ou la sécurité. Il continue de se déplacer à vitesse maximale sans aucun problème. Enfin, le leader applique un freinage brutal. En conséquence, les véhicules du convoi appliquent également un freinage. Il est clair (figure 4.5) que le système est stable et sécurisé.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la commande de la dynamique longitudinale du convoi sur les autoroutes a été abordée. Contrairement à ce qui avait été préalablement affirmé dans la littérature, il est possible d'obtenir un convoi stable en présence de tous types de retards. Un convoi non-homogène avec des retards non-identiques a été étudié. La robustesse de la loi de commande en trouvant les conditions de stabilité et de sécurité en présence de retards d'actionnement, de détection et de communication a été étudiée. Ces conditions sont fondées sur le pire des cas et il s'agit de conditions suffisantes. Cette étude

TABLE 4.1: Heterogeneous platoon parameters

index i	h_i	λ_i	λ_{V_i}	$\tau_i(sec)$	$\Delta_i(sec)$	$\tau_{c_i}(sec)$
1	2.5000	1	0.5000	0.0970	0.1525	0.0801
2	2.4000	1	0.4800	0.0905	0.1836	0.0925
3	2.3000	1	0.4600	0.0973	0.1987	0.0839
4	2.2000	1	0.4400	0.1232	0.1725	0.0875
5	2.1000	1	0.4200	0.0981	0.2055	0.1070
6	2.0000	1	0.4000	0.0998	0.2181	0.1238
7	1.9000	1	0.3800	0.0761	0.2335	0.1210
8	1.8000	1	0.3600	0.0846	0.2396	0.0777
9	1.7000	1	0.3400	0.1199	0.1938	0.1202
10	1.6000	1	0.3200	0.0945	0.1900	0.0845

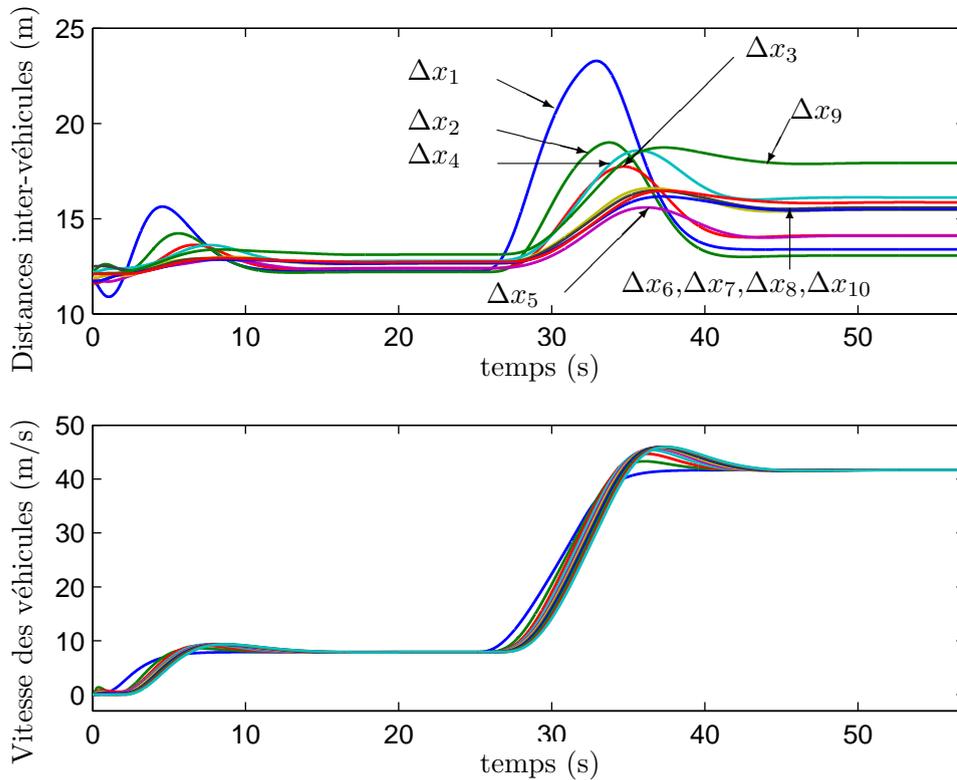


FIGURE 4.4: Les distances inter-véhicules en présence de retards d'actionnement, de détection et de communication

a été faite sur une nouvelle loi proposée. Cette nouvelle loi est une modification de la loi TCI modifiée. Il s'agit d'une loi générale, à partir de laquelle les autres lois importantes (l'espacement constant, classique et TCI modifiée) peuvent être obtenues et donc les conditions de sécurité et de stabilité de chacune de ces lois peuvent être obtenues à partir des conditions pour la nouvelle loi proposée. La validité des résultats obtenus a été vérifiée par simulation (sous Matlab).

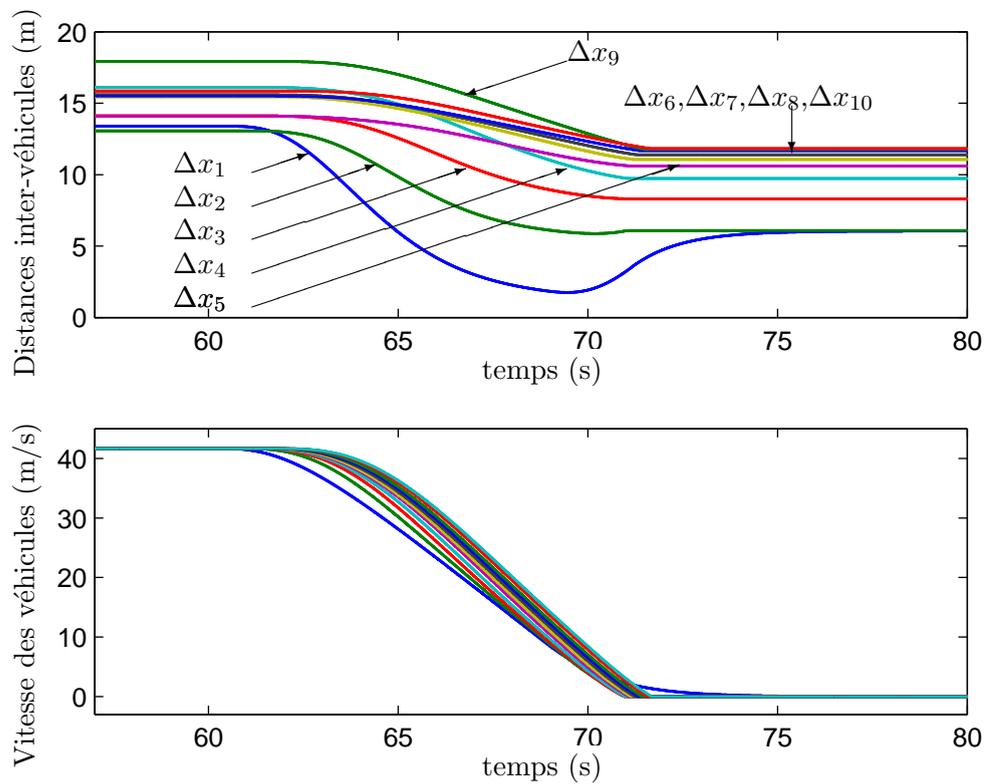


FIGURE 4.5: Les distances entre les véhicules lors d'un arrêt d'urgence

Dans ce chapitre, les contributions principales sont :

- une modification additionnelle de CTI,
- une étude de stabilité et de sécurité du convoi en présence de retards pour plusieurs lois de commande,
- un cadre de 4 lois de commande entre les quelles le basculement est très fluide et robuste selon la disponibilité de la communication.

Une étude plus approfondie, en prenant un modèle plus général pour les retards, doit être faite. Car le modèle proposé de retards suppose que :

- les retards des capteurs dans chaque véhicule sont les mêmes !
- les retards des actionneurs (moteur, freinage) de chaque véhicule sont les mêmes !

Chapitre 5

Conclusion générale et perspectives

5.1 Conclusion générale

Dans ce mémoire, les convois urbains et les convois autoroutiers sont étudiées. Deux modifications sur la loi CTI classique sont proposées. La première modification (CTI modifiée) résoudre la première faiblesse de la CTI classique (réduction importante des distances inter-véhicules). La deuxième modification (CTI améliorée) résoudre les deux faiblesses de CTI classique (les distances inter-véhicules et la faible stabilité autour les faibles fréquences). Ces modifications n'ont aucun effet négatif sur la stabilité et la sécurité. Au contraire, il est montré (pour les systèmes du deuxième ordre) qu' il est possible d'augmenter la stabilité, la robustesse (aux retards d'actionneurs et de capteurs) et éviter la saturation du couple de commande en augmentant h . Cette augmentation n'a pas un grand effet sur les distances inter-véhicules pour les lois proposées, alors qu'il a un effet très négatif sur les distances inter-véhicules lors l'utilisation de la CTI classique. Par ailleurs, les lois proposées ne requièrent pas de lourdes communication comme dans la loi avec une distance fixe.

Un modèle original pour le convoi ("Flatbed tow truck model") est proposé. Ce modèle est une représentation physique des convois lors de l'utilisation des nouvelles lois proposées.

Pour la commande du véhicule, deux modèles sont utilisés. Le premier modèle est constitué d'un modèle dynamique du deuxième ordre pour le comportement longitudinal, couplé avec un modèle cinématique du deuxième ordre pour le comportement latéral. Le deuxième modèle est constitué d'un modèle dynamique longitudinale en prenant en

compte un modèle simplifié du moteur, et le même modèle que précédemment pour le comportement latéral. Les deux dynamiques dans le premier modèle sont découplées et linéarisées ; ce qui donne deux sous-systèmes linéaires (deux doubles intégrateurs). Pour le deuxième modèle de véhicule, les deux dynamiques sont considérées comme découplées. Donc la linéarisation est faite et deux sous-systèmes linéaires (triple intégrateur et double interrogateur) sont obtenus. Puis les lois de commande proposées sont appliquées sur le comportement longitudinal de véhicules. Ce qui concerne le comportement latéral une commande robuste (commande par modes glissants) est utilisée.

La stabilité et la sécurité des convois homogènes et non-homogènes sont étudiées et leurs conditions sont trouvées. La robustesse et la sécurité de convoi en présence de retards d'actionnement, de détection et de communication sont également vérifiées. Cette étude est faite pour la CTI classique, la commande a distance fixe et les deux lois proposées.

Les résultats précédents sont vérifiées par simulation en utilisant Matlab et TORCS pour des convois sur autoroute et en milieu urbain. Les simulations montrent la validité des résultats obtenus. La stabilité et la sécurité des convois homogènes et non-homogènes même en présence de tous les retards mentionnés sont vérifiées. Ce résultat corrige les résultats déjà obtenus dans la littérature, qui affirment qu'il n'est pas possible d'obtenir un convoi stable en présence de retards de propagation dans les informations communiquées du leader vers les autres véhicules.

Ces résultats fournissent un cadre complet et robuste de quatre lois de commande, entre lesquelles on peut basculer de manière fluide selon la disponibilité de la communication.

5.2 Les perspectives

Afin de compléter l'étude de ces lois, il faut prendre en compte plusieurs autres facteurs. La non-homogénéité telle qu'elle a été étudié n'est pas totalement réaliste. En effet, les erreurs de capteurs dans chaque véhicule sont considérées identiques, ce qui n'est pas réel (le capteur de position a un retard différent du capteur de vitesse). Ceci peut induire des modifications des conditions de stabilité et de sécurité.

Un autre facteur de non-homogénéité est la différence entre les capacités maximales des véhicules (vitesse, accélération, à-coup maximum...). Nous pensons que les risques dus aux différences entre les accélérations maximales peuvent être compensés en prenant des distances inter-véhicules non-identiques et variant selon l'accélération maximale.

Il faut aussi prendre en compte le confort des passagers. Ceci peut introduire des contraintes sur l'accélération et l'à-coup maximum dans le mode normal de mouvement. Ces contraintes peuvent augmenter les distances inter-véhicules.

En ce qui concerne la commande et les modèles du véhicule, le modèle cinématique utilisé pour le véhicule peut être étendu pour prendre en compte les glissements, ce qui peut donner une réponse plus précise et permettre d'utiliser le convoi sur des surfaces non asphaltées (un convoi tout-terrain). Une étude importante doit être faite pour vérifier la sensibilité de la linéarisation et étudier l'effet du changement de paramètres du système (la masse, ...) sur le modèle après linéarisation.

Finalement, des expérimentations réelles sont indispensables pour vérifier la stabilité, la sécurité et la robustesse des lois proposées.

Annexes

Annexe A

Définitions et Rappels

A.1 Définitions

Pour un signal scalaire $f(t)$ défini pour $t > 0$, la norme p (L_p) est définie par [143] :

$$\|f(t)\|_p = \left(\int_0^\infty |f(t)|^p dt \right)^{1/p} \quad (\text{A.1})$$

Les normes les plus importantes sont :

La norme (L_1) :

$$\|f(t)\|_1 = \int_0^\infty |f(t)| dt \quad (\text{A.2})$$

La norme euclidienne (L_2) est définie par :

$$\|f(t)\|_2 = \left(\int_0^\infty |f(t)|^2 dt \right)^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

La norme "infinie" (L_∞) s'écrit :

$$\|f(t)\|_{\infty} = \sup_t (|f(t)|) \quad (\text{A.4})$$

La norme L_2 pour la transformée de Laplace $F(s)$ de fonction $f(t)$ est donnée par :

$$\|F(\omega)\|_2 = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega \right)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

Selon le théorème de Parseval il vient :

$$\|F(\omega)\|_2 = \|f(t)\|_2 \quad (\text{A.6})$$

Pour un système linéaire de la forme suivante :

$$y(t) = f(t) * u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) u(\tau) d\tau \quad (\text{A.7})$$

d'où :

$$\|Y(\omega)\|_{\infty} \leq \|F(\omega)\|_{\infty} \|U(\omega)\|_{\infty} \quad (\text{A.8})$$

$$\|y(t)\|_2 \leq \|F(\omega)\|_{\infty} \|u(t)\|_2 \quad (\text{A.9})$$

$$|y(t)| \leq \|y(t)\|_{\infty} \leq \|F(\omega)\|_2 \|u(t)\|_2 \quad (\text{A.10})$$

A.2 Rappel 1

Pour toutes les fonctions impulsionnelles positives $f(t) = \mathcal{L}^{-1}(F(s))$, où $\mathcal{L}^{-1}(\cdot)$ est l'inverse de la transformée de Laplace, il vient [65] :

$$\|f(t)\|_1 = \|F(\omega)\|_\infty \quad (\text{A.11})$$

A.3 Rappel 2

Pour tous les systèmes linéaires $Y(s) = F(s)U(s)$, où $y(t) = \mathcal{L}^{-1}(Y(s))$ est la sortie, $f(t) = \mathcal{L}^{-1}(F(s))$ est la fonction impulsionnelle, $u(t) = \mathcal{L}^{-1}(U(s))$ est l'entrée, selon la théorie des systèmes linéaires, il vient [143, 144] :

$$\|y(t)\|_\infty \leq \|f(t)\|_1 \|u(t)\|_\infty \quad (\text{A.12})$$

Annexe B

Preuves

Pour assurer la stabilité du convoi et pour trouver les conditions sur les retards qui assurent la sécurité, il est nécessaire de trouver $G_{e_i}^*$, $G_{J_i}^*$, $G_{a_i}^*$, $G_{A_{V_i}}^*$, $G_{V_i}^*$.

1 - Une borne maximum pour $\|G_{e_i}(\omega)\|$:

On a :

$$\|G_{e_i}(\omega)\| = \frac{h_i}{h_{i-1}} \sqrt{\frac{b_{i-1}}{b_i + \mu_i}} \quad (\text{B.1})$$

où

$$b_i(\omega) = \omega^2 + \lambda_i^2$$

et

$$\mu_i(\omega) = \tau_i^2 h_i^2 \omega^6 + (h_i^2 - 2h_i \tau_i (1 + \lambda_i h_i) \cos(\Delta_i \omega)) \omega^4 - 2h_i \sin(\Delta_i \omega) (1 + \lambda_i (h_i - \tau_i) - \lambda_{V_i} \tau_i) \omega^3 + (2\lambda_i h_i (1 - \cos(\Delta_i \omega)) + \lambda_i^2 h_i^2 - 2\lambda_{V_i} h_i \cos(\Delta_i \omega)) \omega^2 + \lambda_{V_i}^2 + 2\lambda_{V_i} \lambda_i$$

Une condition suffisante pour rendre le premier terme dans (4.16) borné est d'imposer $\|G_{e_i}(\omega)\| < 1$. Il est aussi préférable d'imposer $\|G_{e_i}(\omega)\|_\infty = \|G_{e_i}(0)\|$, ce qui peut réduire les effets de l'(i - 1)-eme erreur sur l'i-eme erreur et permet de connaître la borne maximum pour l'erreur. Pour vérifier les contraintes précédentes il est suffisant d'avoir : $\|G_{e_i}(\omega)\| \leq \|G_{e_i}(0)\| = \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} < 1$.

$$\|G_{e_i}(\omega)\| \leq \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} \text{ nous donne :}$$

$$\Gamma_i = b_i + \mu_i - b_{i-1} \left(\frac{\lambda_i + \lambda_{V_i}}{\lambda_{i-1}} \right)^2 \geq 0$$

On a toujours $-\cos(\Delta_i\omega) \geq -1$ pour tout $\omega > 0$. Il est imposé $1 + \lambda_i(h_i - \tau_i) - \lambda_{V_i}\tau_i \geq 0$ pour que le coefficient de $\sin(\Delta_i\omega)\omega^3$ soit toujours négatif, et $\sin(\Delta_i\omega) \leq \Delta_i\omega \forall \omega > 0$; donc il vient :

$$\Gamma_i \geq \alpha_1\omega^6 + \alpha_2\omega^4 + \alpha_3\omega^2 \quad (\text{B.2})$$

Où $\alpha_1 = h_i^2 \tau_i^2$, $\alpha_3 = \lambda_i^2 h_i^2 - 2\lambda_{V_i} h_i + 1 - \frac{(\lambda_i + \lambda_{V_i})^2}{\lambda_{i-1}^2}$, $\alpha_2 = \beta_1 h^2 + \beta_2 h_i$, $\beta_1 = (1 - 2\lambda_i\tau_i - 2\lambda_i\Delta_i)$, $\beta_2 = 2((\lambda_i + \lambda_{V_i})\tau_i\Delta_i - (\tau_i + \Delta_i))$

Si la condition suivante

$$\alpha_1\omega^6 + \alpha_2\omega^4 + \alpha_3\omega^2 \geq 0 \quad (\text{B.3})$$

est satisfaite, alors $\Gamma_i > 0$ est vérifiée.

L'inégalité précédente est équivalente à l'inégalité suivante $\forall \omega^2 > 0$:

$$\alpha_1\omega^4 + \alpha_2\omega^2 + \alpha_3 \geq 0 \quad (\text{B.4})$$

Une condition suffisante qui assure l'inégalité est quand tous les coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ sont positifs. Elle est satisfaite en remplissant les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i < \frac{h_i - 2(\Delta_i + \tau_i) - 2\lambda_{V_i}\tau_i\Delta_i}{2(h_i(\Delta_i + \tau_i) - \Delta_i\tau_i)} \text{ et } \lambda_i > \frac{\lambda_{V_i}\tau_i - 1}{h_i - \tau_i} \text{ et} \\ h_i > 2(\Delta_i + \tau_i) + 2\lambda_{V_i}\tau_i\Delta_i \text{ et } \frac{h_i}{h_{i-1}} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} < 1 \\ \text{et } \lambda_{i-1}^2 > \frac{(\lambda_i + \lambda_{V_i})^2}{\lambda_i^2 h_i^2 - 2\lambda_{V_i} h_i + 1} \end{array} \right. \quad (\text{B.5})$$

Dans ce cas, il y a aussi :

$$\|\zeta_i(\omega)\| = \sqrt{b_i + \mu_i} \geq \frac{\sqrt{b_{i-1}}}{\lambda_{i-1}} (\lambda_i + \lambda V_i) \geq \lambda_i + \lambda V_i > 0 \quad (\text{B.6})$$

donc $\|\zeta_i(\omega)\|$ ne peut pas être nul.

D'où

$$\sqrt{\frac{\lambda_1^2}{b_i + \mu_i}} \leq \sqrt{\frac{b_i}{b_i + \mu_i}} = \sqrt{\frac{b_{i-1}}{b_i + \mu_i}} \leq \frac{\lambda_1}{\lambda_i + \lambda V_i} \quad (\text{B.7})$$

2 - Trouver $\|G_{A_{V_i}}\|_\infty, \|G_{a_{V_i}}\|_\infty$:

Aux basses fréquences le gain de $\|G_{A_{V_i}}\|_\infty$ et $\|G_{a_i}(\omega)\|$ diverge vers l'infini ($\|G_{A_{V_i}}(\omega)\| \rightarrow \infty$ lors $\omega \rightarrow 0$) sauf si la condition (4.20) est satisfaite.

En assurant la condition (4.20) il vient :

$$\|G_{A_{V_i}}(\omega)\| = \sqrt{\frac{h_i^2 \lambda_i^2 (2 - 2 \cos(\Delta_{c_i} \omega))}{b_i + \mu_i \omega^2}} \quad (\text{B.8})$$

En utilisant la série de Taylor au voisinage de $\omega = 0$, $\sqrt{2 - 2 \cos(\Delta_{c_i} \omega)} \rightarrow |\Delta_{c_i}| \omega$. Aux voisinage de zéro, il vient :

$$\|G_{A_{V_i}}(0)\| = h_i \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda V_i} |\Delta_{c_i}| \quad (\text{B.9})$$

Il est préférable de rendre $\|G_{A_{V_i}}\|_\infty$ aussi petit que possible pour diminuer l'effet de l'erreur générée par le retard de communication, et qui se propage à travers le convoi. Donc, il est souhaitable que $\|G_{A_{V_i}}(\omega)\|_\infty = \|G_{A_{V_i}}(0)\|$. $\|G_{A_{V_i}}\|$ peut s'écrire :

$$\|G_{A_{V_i}}(\omega)\| = h_i \underbrace{\sqrt{\frac{\lambda_i^2}{b_i + \mu_i}}}_{\eta_1} \underbrace{\sqrt{\frac{2 - 2 \cos(\Delta_{c_i} \omega)}{\omega^2}}}_{\eta_2} \quad (\text{B.10})$$

en satisfaisant (3.67) et (4.20), à partir de (B.7), il est conclut que $\eta_1 \leq \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_{V_i}}$.

De plus, $\eta_2 \leq \Delta_{c_i}$ car :

$$\eta_2 \leq \sqrt{\frac{4 \sin^2(\Delta_{c_i} \omega/2)}{\omega^2}} \leq \sqrt{\frac{4(\Delta_{c_i} \omega/2)^2}{\omega^2}} \leq |\Delta_{c_i}| \quad (\text{B.11})$$

donc $\|G_{A_{V_i}}(\omega)\| \leq \|G_{A_{V_i}}(0)\|$ pour tout ω et :

$$\|G_{A_{V_i}}(\omega)\|_{\infty} = \|G_{A_{V_i}}(0)\| = h_i \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} |\Delta_{c_i}| \quad (\text{B.12})$$

3 - Trouver $\|G_{V_i}(\omega)\|_{\infty}$, $\|G_{a_i}(\omega)\|_{\infty}$, $\|K_{\hat{A}_V}(\omega)\|_{\infty}$, $\|K_{V_p}(\omega)\|_{\infty}$:

La condition donnée en (4.18) empêche $\|G_{V_i}(\omega)\|_{\infty}$ de tendre vers l'infini aux basses fréquences.

Avec exactement le même raisonnement fait précédemment pour trouver $\|G_{A_{V_i}}\|_{\infty}$, il vient :

$$\|G_{V_i}(\omega)\|_{\infty} = \|G_{V_i}(0)\| = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} |\Delta_{c_i}| \quad (\text{B.13})$$

$$\|G_{a_i}(\omega)\|_{\infty} = \|G_{a_i}(0)\| = h_i \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} |\Delta_i - \Delta_{i-1}| \quad (\text{B.14})$$

$$\|K_{\hat{A}_V}(\omega)\|_{\infty} = \|K_{\hat{A}_V}(0)\| = h_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} |(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}| \quad (\text{B.15})$$

$$\|K_{V_p}(\omega)\|_{\infty} = \|K_{V_p}(0)\| = \frac{\lambda_{V_1}}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} |(\Delta_V - \Delta_1) + \tau_{c_1}| \quad (\text{B.16})$$

4 - $\|G_{J_i}\|_{\infty}$:

$$\|G_{J_i}\| = |\tau_i - \tau_{i-1}| h_i \sqrt{\frac{1}{b_i + \mu_i}} \quad (\text{B.17})$$

Si $\omega = 0$ alors $\|G_{J_i}(0)\| = h_i \frac{|\tau_i - \tau_{i-1}|}{\lambda_i + \lambda_{V_i}}$.

Il est également préférable de rendre $\|G_{J_i}\|_\infty$ aussi petit que possible, il est souhaitable d'imposer $\|G_{J_i}(\omega)\|_\infty \leq \|G_{J_i}(0)\|$ pour tout ω . En satisfaisant (3.67), (4.20), à partir de (B.7) il vient que $\|G_{J_i}(\omega)\|_\infty \leq h_i \frac{|\tau_i - \tau_{i-1}|}{\lambda_i + \lambda_{V_i}}$ donc :

$$\|G_{J_i}(\omega)\|_\infty = \|G_{J_i}(0)\| = h_i \frac{|\tau_i - \tau_{i-1}|}{\lambda_i + \lambda_{V_i}} \quad (\text{B.18})$$

De la même manière que précédemment :

$$\|K_{e_V}(\omega)\|_\infty = \|K_{e_V}(0)\| = \frac{\lambda_{V_1}}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} \quad (\text{B.19})$$

5 - Calcul de $\|K_{A_V}\|_\infty$:

$\|K_{A_V}\|_\infty$ est calculé comme suit :

$$\|K_{A_V}\| = h_1 \sqrt{\frac{\tau_1^2 \omega^2 + 1}{b_1 + \mu_1}} \quad (\text{B.20})$$

d'où $\|K_{A_V}(0)\| = \frac{h_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}$.

Il est également préférable de faire $\|K_{A_V}\|$ le plus petit que possible et obtenir $\|K_{A_V}(\omega)\|_\infty \leq \|K_{A_V}(0)\|$ pour tout ω . Par la même discussion fait pour $\|G_{e_i}(\omega)\|$, il est possible de trouver la condition qui satisfait l'inégalité précédente :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 < \frac{h_1 - 2(\Delta_1 + \tau_1) - 2\lambda_{V_1} \tau_1 \Delta_1}{2h_1(\Delta_1 + \tau_1) - 2\Delta_1 \tau_1} \text{ et } \lambda_1 > \frac{\lambda_{V_1} \tau_1 - 1}{h_1 - \tau_1} \text{ et} \\ h_1 \geq 2(\Delta_1 + \tau_1) + 2\lambda_{V_1} \tau_1 \Delta_1 \text{ et } \tau_1^2 \leq \frac{1 + \lambda_1^2 h_1^2 - 2\lambda_{V_1} h_1}{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2} \end{array} \right\} \quad (\text{B.21})$$

d'où :

$$\|K_{A_V}(\omega)\|_\infty = \|K_{A_V}(0)\| = \frac{h_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} \quad (\text{B.22})$$

6 - $\|K_{\dot{e}_V}\|$

$\|K_{\dot{e}_V}(0)\| = \frac{h_1\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}$. il est nécessaire de rendre $\|K_{\dot{e}_V}\|$ aussi petit que possible pour réduire l'effet de \dot{e}_V sur e_1 .

$$\|K_{\dot{e}_V}(\omega)\| = h_1 \sqrt{\frac{\tau^2 \omega^4 + (1 - 2\tau_1 \lambda_1 \cos(\Delta_1 \omega)) \omega^2 - 2\lambda_1 \sin(\Delta_1 \omega) \omega + \lambda_1^2}{b_i + \mu_i}} \quad (\text{B.23})$$

Pour obtenir $\|K_{\dot{e}_V}\|_\infty = \|K_{\dot{e}_V}(0)\|$, il est possible d'imposer $\|K_{\dot{e}_V}(\omega)\| \leq \frac{h_1\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}}$. Ce qui donne :

$$\Upsilon_1 = \tau_1 \omega^6 + [h_1^2 - \tau_1^2 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} - 2h_1 \tau_1 (1 + \lambda_1 h_1) \cos(\Delta_1 \omega)] \omega^4 - 2h_1 \sin(\Delta_1 \omega) [(1 + \lambda_1 h_1) - \tau_1 (\lambda_1 + \lambda_{V_1})] \omega^3 + [(1 + \lambda_1 h_1)^2 - 2h_1 (\lambda_1 + \lambda_{V_1}) - \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} (1 - 2\tau_1 \lambda_1 \cos(\Delta_1 \omega))] \omega^2 + 2 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} \lambda_1 \sin(\Delta_1 \omega) \omega$$

Il vient $-\cos(\Delta_1 \omega) \geq -1$, et $\sin(\Delta_1 \omega) \leq \Delta_1 \omega$. D'où :

$$\Upsilon_1 \geq \tau_1 \omega^6 + [h_1^2 - \tau_1^2 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} - 2h_1 \tau_1 (1 + \lambda_1 h_1) \cos(\Delta_1 \omega) - 2h_1 \Delta_1 [(1 + \lambda_1 h_1) - \tau_1 (\lambda_1 + \lambda_{V_1})]] \omega^4 + [(1 + \lambda_1 h_1)^2 - 2h_1 (\lambda_1 + \lambda_{V_1}) - \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} (1 - 2\tau_1 \lambda_1 \cos(\Delta_1 \omega)) - 2 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} \lambda_1 \sin(\Delta_1 \omega)] \omega^2 \geq 0$$

Pour satisfaire cette inégalité, il suffit de rendre tous les coefficients de ω^2 positif. Ceci peut être assuré en imposant les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} h_1^2 \geq \tau_1^2 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})^2}{\lambda_1^2} + 2h_1 \tau_1 (1 + \lambda_1 h_1) + 2h_1 \Delta_1 [(1 + \lambda_1 h_1) - \tau_1 (\lambda_1 + \lambda_{V_1})] \\ \text{et } \Delta_1 \frac{(\lambda_1 + \lambda_{V_1})}{\lambda_1} + \tau_1 \leq \frac{1}{2} h_1 (\lambda_1 h_1 - \frac{2\lambda_{V_1}}{\lambda_1}) \quad \text{et} \quad \lambda_1^2 h_1 \geq 2\lambda_{V_1} \end{array} \right\} \quad (\text{B.24})$$

D'où :

$$\|K_{\dot{e}_V}\|_\infty = \|K_{\dot{e}_V}(0)\| = \frac{h_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_{V_1}} \quad (\text{B.25})$$

Annexe C

TORCS

C.1 Le modèle du véhicule dans TORCS

Le moteur de jeu de TORCS est contenu dans le dossier `simuv2` (ou `simuv3`) de logiciel, dans lequel la dynamique de la voiture a été implémentée. Ce moteur est un moteur dédié à TORCS. La version implémentée dans `simuv3` est un peu plus complexe mais est toujours en cours de développement. Dans les travaux de thèse `simuv2` a été utilisé. Malheureusement, il n'y a aucune documentation pour le code et les modèles physiques de TORCS, donc le modèle a été extrait à partir du code source.

Les entrées de commande du véhicule sont en rouge sur la figure (C.1) :

- Cmd_{dir} l'angle de direction $[-1.0, 1.0]$,
- Cmd_{acc} la commande d'accélération $[0.0, 1.0]$,
- Cmd_{fr} la commande de freinage $[0.0, 1.0]$,
- Cmd_{ebyg} l'embrayage $[0.0, 1.0]$,
- Cmd_{BV} la boîte de vitesses $[-1,6]$.

Les modèles les plus importants dans TORCS sont :

1. Aérodynamique,

Le modèle aérodynamique de la voiture prend en compte les facteurs suivants :

- La surface frontale de la voiture,
- Les effets d'aileron, de sol et de diffuseur,

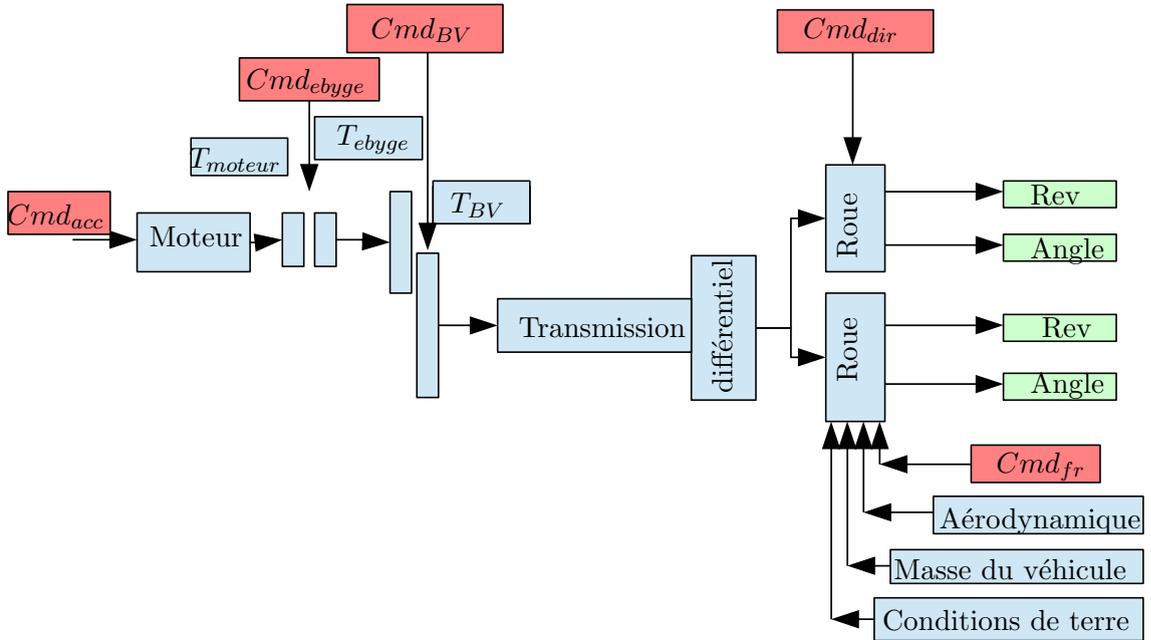


FIGURE C.1: Les sous-systèmes de la voiture

- L'effet de la voiture précédente et de la suivante (qui a l'effet le plus important) a été aussi pris en compte,
- L'effet des collisions. Ces collisions affectent la forme de la voiture et donc le facteur de résistance aérodynamique. Cet effet a été pris en compte en utilisant un modèle simple et linéaire.

Le modèle utilisé pour la force de traînée aérodynamique est donné par l'équation :

(2.1)

$$F_{Aero_{drag_i}} = -0.5 \rho C_d A \text{sign}(v) v^2 (1 + k_{damage}) k_{drag_i}^2 \quad (C.1)$$

où

- k_{damage} est le facteur de dégâts du véhicule. Les valeurs sont dans l'intervalle $[0, 1]$
- k_{drag} est le facteur d'effet des autres véhicules sur le véhicule. Ce facteur prend en compte l'effet d'une seule voiture, qui a l'effet le plus important (selon sa position et sa forme) et ignore les effets des autres véhicules. Selon le modèle proposé k_{drag_i} est donné par :

$$k_{drag_i} = 1 - \max\left(e^{-\frac{2 |x_i - x_j|}{C_{d_j} v_j}}, 0.15 e^{-\frac{8 |x_i - x_j|}{C_{d_i} v_i}}\right) \quad (C.2)$$

Donc l'existence d'un autre véhicule peut réduire la force de traînée.

Pour ce qui est de la force de portance générée par la forme du véhicule, elle est donnée par :

$$\begin{aligned} F_{aero_{lift_0}} &= -2 k_{Clift_0} e^{-3 hm} v^2 \\ F_{aero_{lift_1}} &= -2 k_{Clift_1} e^{-3 hm} v^2 \\ hm &= 1.5 (Rh_0 + Rh_1 + Rh_2 + Rh_3)^4 \end{aligned} \quad (C.3)$$

où :

$F_{aero_{lift_0}}, F_{aero_{lift_1}}$ sont les forces de portance avant et arrière du véhicule.

Rh_0, Rh_1, Rh_2, Rh_3 sont les hauteurs du bas du véhicule des quatre côtés,

k_{Clift_0}, k_{Clift_1} sont les coefficients de portance avant et arrière respectivement.

Les forces de portance et de traînée des ailerons sont aussi prises en compte. Les forces générées par les ailerons sont une force verticale de portance F_z et une force horizontale de traînée F_x donnée par :

$$\begin{aligned} F_x &= -1.23 s_{wing} v^2 (1 + k_{dammage}) \sin(\alpha_{attack}) \\ F_z &= -4.92 s_{wing} v^2 (1 + k_{dammage}) \sin(\alpha_{attack}) \end{aligned} \quad (C.4)$$

où :

α_{attack} est l'incidence (Figure C.2)

s_{wing} est la superficie d'ailerons.

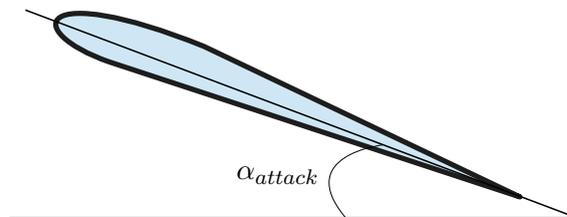


FIGURE C.2: L'incidence

2. La dynamique du moteur,

Le modèle du moteur dans TORCS est un modèle simple qui ne prend pas en compte les retards.

Le couple généré par le moteur est donné par l'équation :

$$T_{moteur} = T_{max} (accel_{Cmd} (1 + Eng_{Brk}) - Eng_{Brk}); \quad (C.5)$$

où

- $accel_{Cmd}$ est la commande d'accélération,
- $Eng_{Brk} = K_{freinage} \frac{rev_m - rev_{min}}{rev_{max} - rev_{min}}$
- $K_{freinage}$: coefficient de freinage,
- rev_m : vitesse de rotation du moteur,
- rev_{min} vitesse de rotation minimale du moteur ("tickover"),
- rev_{max} vitesse de rotation maximale du moteur,
- T_{max} valeur maximale du couple généré par le moteur,

T_{max} varie avec la vitesse de rotation du moteur. Ses valeurs sont données par une carte de moteur et par :

$$T_{max}(rev_m) = A(rev_m) rev_m + B(rev_m); \quad (C.6)$$

$A(rev_m), B(rev_m)$ sont les paramètres de la carte du moteur. Ils sont fonction de la vitesse de rotation du moteur.

Il est possible de voir que le couple maximal du moteur peut être atteint en une seule période en faisant varier $accel_{Cmd}$ de 0 à 1, ce qui n'est pas réaliste. Donc le modèle du moteur n'est pas satisfaisant tel quel. Ce modèle a été remplacé par un modèle simple mais plus réaliste en prenant un modèle du premier ordre (2.7). Ce modèle peut être étendu à un modèle plus complet.

3. La dynamique du système de transmission du couple moteur

Le système de transmission est constitué de :

- **L'embrayage**, élément permettant d'isoler la transmission du moteur. Il peut être, dans TORCS, soit automatique soit manuel. Le modèle de l'embrayage est simple. Dans ce modèle l'entrée est égale au moment produit par le moteur. La sortie a deux états : soit l'embrayage est libre et la sortie est égale à zéro, soit l'embrayage est couplé et la sortie est égale à l'entrée. Encore une fois, ce modèle est instantané et ne prend pas en compte le temps pour le transfert. Pour être plus réaliste, il faut changer la commande de l'embrayage "car->ctrl->clutchCmd" ou " $k_{emb} = clutch->transferValue$ " en prenant en compte un temps de réponse.

La sortie de l'embrayage est donnée par :

$$T_{q_{cluch}} = T_{moteur} k_{cluch} \quad (C.7)$$

k_{cluch} le coefficient de transfert [0,1],

- **boîte de la vitesse,**

La boîte de vitesses est un dispositif pour augmenter le couple "apparent" du moteur en réduisant la vitesse de rotation, avec un facteur d'efficacité k_{eff} . L'entrée de la boîte de vitesses est la sortie de l'embrayage. Donc le couple à la sortie de la boîte de vitesses est égal à :

$$T_{gear} = T_{moteur} k_{cluch} k_{gear} k_{eff} \quad (C.8)$$

ou k_{gear} est le coefficient de conversion, k_{eff} l'efficacité de conversion.

- **transmission (pont, différentiel...)** La transmission transmet le couple moteur vers les roues. En même temps, des effets inverses sont transmis vers le moteur. Ces effets sont l'effet de freinage, la charge et l'inertie, comme indiqué figure C.3. La vitesse de rotation des roues est définie selon le couple moteur, l'inertie de tous les systèmes (embrayage, boîte de vitesses, différentiel, roues), la charge du véhicule et les couples de freinage. Ce qui définit la vitesse de rotation de l'arbre de transmission, puisque la vitesse de rotation du moteur et donc le couple maximal $T_{max}(rev_m)$.

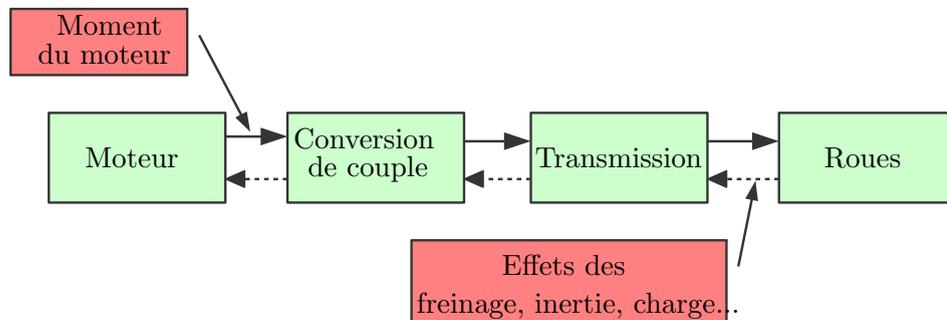


FIGURE C.3: La transmission du couple moteur et la rétroaction des effets de freinage, inertie, charge...

4. La dynamique du système de freinage,

La dynamique du système de freinage est modélisée pour chaque roue, et donnée par :

$$Tq_{brk} = k_{brk} P_{brk} \quad (C.9)$$

où

- $P_{brk} = C_{brk} k_{rep}$ la pression de freinage,
- C_{brk} la commande de freinage $[0,1]$,
- k_{rep} la répartition des masses du véhicule sur les roues arrière et avant,
- $k_{brk} = R_{brk} S_{brk} \mu$ le coefficient de freinage,
- R_{brk} le rayon de disque de freinage,
- S_{brk} la surface du piston de freinage,
- μ le coefficient de friction de la surface des plaquettes de frein.

De nouveau, le retard n'est pas pris en compte. Donc le freinage peut atteindre sa valeur maximale instantanément en faisant passer C_{brk} de 0 à 1.

Le freinage a un effet sur la vitesse de rotation des roues libres (non-actionnées). Il réduit la vitesse de rotation de la roue à chaque pas d'échantillonnage comme suit :

$$\delta rev = -sign(rev_{whl}) \frac{Tq_{brk} T_s}{I} \quad (C.10)$$

où

- rev_{whl} la vitesse de rotation de la roue,
- T_s la période d'échantillonnage,
- $I = I_{whl} + I_{axis}/2$,
- I_{axis} l'inertie de l'axe,
- I_{whl} l'inertie de la roue non-actionnée.

Pour les roues actionnées, l'effet du freinage est plus complexe, car ce moment va réduire la vitesse des roues actionnées (donc les axes de différentielle et puis la vitesse révolutionnaire du moteur). C'est l'effet de rétroaction dans le système motopulseur/freinage.

5. La dynamique des roues et le contact roues/sol

Le modèle des roues et le contact avec le sol est le modèle le plus complexe dans le véhicule, et il représente la partie la plus importante dans le modèle du véhicule.

Dans TORCS, les quatre roues ont un modèle complexe. Il prend en compte le rayon de jante, la dimension du pneu, la pression, l'inertie, la masse et la charge sur les roues. Il y a deux modèles de roues, un pour les roues libres (non-actionnées) et un pour les roues actionnées.

Le modèle de contact roues/sol est le modèle de **Pacejka**, qui est un modèle précis pour calculer les forces longitudinales et latérales sur les pneus.

La formule est donnée par :

$$F_p = \sin(c \arctan(b (1 - e) k + e \arctan n(b k))) (1 + k_g(skillLevel)); \quad (C.11)$$

où

b, c, d les paramètres du modèle,

$k_s(skillLevel)$ fonction du niveau de difficulté de jeu.

Le problème avec ce modèle est que ses paramètres dans TORCS ne sont pas des paramètres réels ¹. En plus, dans le modèle il y a un facteur de niveau de compétence, ce facteur a été mis pour changer la difficulté du jeu, ce qui donne une réaction qui n'est pas réaliste.

6. La dynamique du système de direction

Le modèle du système de direction est très simple et il ne prend en compte ni le retard ni l'inertie de système de direction, donc la réponse est aussi instantanée. La vitesse de rotation de la direction est bornée. Ce modèle n'est pas précis et ne représente pas la réalité. Des changements ont été réalisés sur le code pour produire un retard sur la réponse pour rendre le modèle plus réaliste. Un temps de réponse égal à τ_s a été ajouté, et la réponse du système de direction devient égale à la réponse d'un système du première ordre (2.6).

7. La dynamique du système de suspension,

Le système de suspension est constitué de ressorts et d'amortisseurs. La force générée par le ressort est donnée pour deux modes de mouvement, le mode rapide et le mode lent par :

$$F_{amor} = \text{sign}(v_{amor}) (C_{amor_j} |v_{amor}| + b_{amor_j}) \quad (C.12)$$

¹Comparison of racing simulators

C_{amor_j}, b_{amor_j} sont les paramètres d'amortisseur ($j = 1, 2$ pour les mouvements lent et rapide),

v_{amor} est la vitesse de mouvement de l'amortisseur (suspension travel speed).

La force du ressort est donnée par :

$$F_{ress} = K_{ress}(x_{ress} - x_{ress_0}) \quad (C.13)$$

où K_{ress} est la raideur du ressort, x_{ress} sa longueur, x_{ress_0} sa longueur à vide,

Les paramètres du véhicule peuvent être modifiés en utilisant un outil informatique "Torcs-car-setup-editor" (figure C.4). Il est possible de modifier :

- Les paramètres de la force aérodynamique du véhicule et des ailerons (avant et arrière),
- Les paramètres de masse du véhicule, le volume de carburant et la répartition de masse,
- Les paramètres principaux du moteur (inertie, vitesse de rotation maximale et minimale...) et les paramètres avancés (carte de couple moteur...),
- Les paramètres de boîte de vitesses (rapports de boîte, efficacité, inertie...),
- Les paramètres du système de freinage...
- Les paramètres des roues,
- Les paramètres du système de direction et du différentiel,
- Les paramètres du véhicule et la position du chauffeur,
- Les paramètres du système d'amortissement pour chaque roue,

Le modèle du véhicule dans TORCS est un modèle complexe et quasiment suffisant pour la vérification de la stabilité et peut être la sécurité du convoi. Mais il faut faire des améliorations, en ajoutant un modèle plus complet pour le moteur, le système de direction... et surtout ajouter des retards d'actionnement et des capteurs.

Des changements ont été effectués dans TORCS pour créer un convoi, vérifier les modèles et lois de commande. De nouveaux modèles pour le moteur ont été ajoutés et pour le système de direction. Pour être plus réalistes, des retards dans la réponse du moteur,

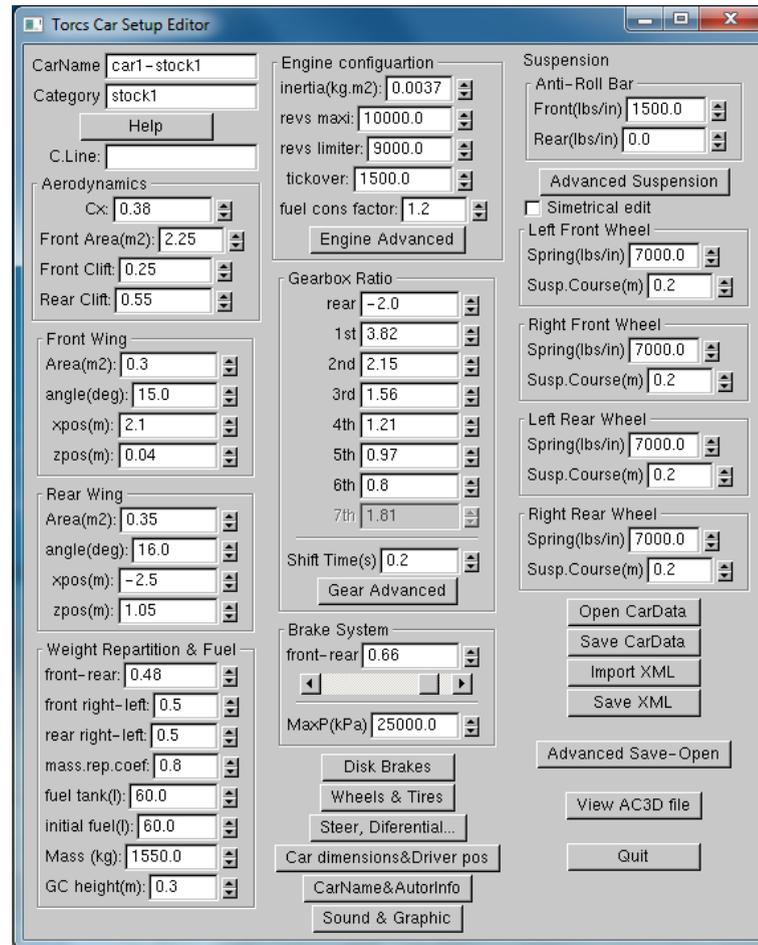


FIGURE C.4: "Torcs Car Editor"

du système de freinage et du système de transmission ont été ajoutés. Les voitures ont été retenues paramétrables, ce qui nous permet de choisir entre les nouveaux modèles et les modèles originaux très facilement. Il est possible d'activer/déactiver les effets de l'une ou de toutes les forces extérieures, choisir la loi de commande et les informations demandées.

Bibliographie

- [1] J. K. Hedrick, Y. Chen, and S. Mahal, “Optimized Vehicle Control/Communication Interaction in an Automated Highway System,” Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-2001-29, Institute of transportation studies, university of California, Berkeley, California, 2001.
- [2] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “Minimizing the inter-vehicle distances of the time headway policy for urban platoon control with decoupled longitudinal and lateral control,” in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (The Hague, The Netherlands), pp. 1805– 1810, Oct. 2013.
- [3] R. Lenain, *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles en présence de glissement*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2005.
- [4] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, “Mixed Kinematic and Dynamic Sideslip Angle Observer for Accurate Control of Fast Off-Road Mobile Robots,” *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 2004, pp. 181–196, 2010.
- [5] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “Urban Platooning Using a Flatbed Tow Truck Model,” in *The intelligent Vehicles Symposium (IV)*, (Seoul, Korea), June 2015.
- [6] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “The flatbed platoon towing model for safe and dense platooning on highways,” *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, vol. 7, pp. 58 – 68, Jan. 2015.
- [7] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “Minimizing the inter-vehicle distances of the time headway policy for platoon control on highways,” in *10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO13)*, (Reykjavik, Iceland), pp. 417–424, SciTePress, July 2013.
- [8] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “Safe Platooning in the Event of Communication Loss using the Flatbed Tow Truck Model,” in *the 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, no. 2, (Singapore, Singapore), pp. 1644–1649, Dec. 2014.

- [9] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, “Enhanced Flatbed Tow Truck Model for Stable and Safe Platooning in the Presences of Lags , Communication and Sensing Delays,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (Seattle, Washington), May 2015.
- [10] I. Thomson and A. Bull, “Urban traffic congestion : its economic and social causes and consequences,” *CEPAL Review* 76, pp. 105 – 116, 2002.
- [11] D. Schrank, B. Eisele, and T. Lomax, “2012 urban mobility report powered by INRIX Traffic Data,” tech. rep., Texas A&M Transportation Institute, Texas, 2012.
- [12] G. Duranton and M. A. Turner, “The fundamental law of road congestion : evidence from US cities,” tech. rep., National bureau of economic research, N 15376, Cambridge, 2009.
- [13] Y. Hayashi, “Transport Solutions for Congestion and Climate Change Control in Developing,” *LTA Academy JOURNEYS Sharing Urban Transport Solutions*, vol. 5, pp. 39–48, 2010.
- [14] Z. Jin, *Contribution à la Commande d ’un Train de Véhicules Intelligents*. PhD thesis, École Centrale de Lille, Sept. 2010.
- [15] S. Shladover, “Recent International Activity in Cooperative Vehicle–Highway Automation Systems,” Tech. Rep. FHWA-HRT-12-033, Federal Highway Administration Research and Technology, 2012.
- [16] S. Shladover, “Literature Review on Recent International Activity in Cooperative Vehicle–Highway Automation Systems,” Tech. Rep. FHWA-HRT-13-025, 2012.
- [17] P. Fernandes and U. Nunes, “Algorithms for management of a multi-platooning system of IVC-enabled autonomous vehicles, with high traffic capacity,” in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (Washington, DC), pp. 1935–1941, 2011.
- [18] M. H. Massot and E. Lapierre, “PRAXITELE : the missing link,” in *Public transport planning and management. Proceedings of seminar E, held at the aet european transport conference*, (Cambridge, UK, Robinson College), Jan. 1999.
- [19] L. Adouane, R. Aufrère, P. Avanzini, G. Bresson, R. Chapuis, J. P. Derutin, E. Royer, B. Thuilot, M. V. Ventura, and B. Dafflon, “SafePlatoon : Sûreté de Convois de Véhicules Autonomes,” in *Journées Nationales des Communications dans les Transports*, no. 09, (Nevers, France), May 2013.

- [20] S. Sheikholeslam, C. a. Desoer, and T. Agency, “Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles ; III : Nonlinear Model,” Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-90-1, Institute of transportation studies, University of California at Berkeley, California, 1990.
- [21] S. C. Warnick and A. A. Rodriguez, “A Systematic Antiwindup Strategy and the Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles with Control Saturations,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 3, pp. 1006–1016, 2000.
- [22] A. Ferrara and C. Vecchio, “Sliding Mode Control for Automatic Driving of a Platoon of Vehicles,” in *International Workshop on Variable Structure Systems*, (Alghero, Italy), pp. 262–267, June 2006.
- [23] S. Shahab and C. A. Desoer, “Longitudinal Control Of A Platoon Of Vehicles. II, First And Second Order Time Derivatives Of Distance Deviations,” Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-89-6, UC Berkeley : California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), California, Jan. 1989.
- [24] J. K. Hedrick, V. Garg, J. C. Gerdes, D. B. Maciuca, and D. Swaroop, “Longitudinal Control Development for IVHS Fully Automated and Semi-Automated System : Phase III,” Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-97-20, Universtiy of California, Berkeley, UC Berkeley, 1997.
- [25] S. Tsugawa, “Results and issues of an automated truck platoon within the energy ITS project,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, pp. 642–647, 2014.
- [26] J. Ploeg, S. Shladover, H. Nijmeijer, and N. van de Wouw, “Introduction to the Special Issue on the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 989–993, 2012.
- [27] N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, and J. C. Fauroux, “A rollover indicator based on the prediction of the load transfer in presence of sliding : Application to an all terrain vehicle,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Roma), pp. 1158–1163, 2007.
- [28] A. Dávila and M. Nombela, “SARTRE : Safe Road Trains for the Environment,” in *Conference on Personal Rapid Transit PRT@LHR*, (London Heathrow), Sept. 2010.
- [29] J.-P. Brossard, *Dynamique du véhicule : Modélisation des systèmes complexes*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Sciences appliquees INSA Lyon, 2006.

- [30] B. K. Powell and J. A. Cook, "Nonlinear Low Frequency Phenomenological Engine Modeling and Analysis," in *American Control Conference*, no. 9, (Minneapolis, MN, USA), pp. 332–340, 1987.
- [31] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer Science, 1 ed., 2006.
- [32] S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles I : Linear Model," Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-89-3, EECS Department, University of California, Berkeley, 1989.
- [33] F. Kienhöfer and D. Cebon, "Improving abs on heavy vehicles using slip," tech. rep., Cambridge University Engineering Department, Cambridge, 2006.
- [34] J. K. Hedrick, D. McMahon, V. Narendran, and D. Swaroop, "Longitudinal Vehicle Controller Design for IVHS Systems," in *American Control Conference*, no. 4, (Boston, MA, USA), pp. 3107–3112, 1991.
- [35] E. Bakker, L. Nyborg, and H. Pacejka, "Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies," in *Society of Automotive Engineers international congress and expo*, (Detroit, MI, USA), 1987.
- [36] R. Brach and M. Brach, "The Tire-Force Ellipse (Friction Ellipse) and Tire Characteristics," *Society of Automotive Engineers SAE*, no. 2011-01-0094, 2011.
- [37] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers SAE, Inc, Feb. 1992.
- [38] A. B. Proca and A. Keyhani, "Identification of power steering system dynamic models," *Mechatronics*, vol. 8, no. 1998, pp. 255–270, 2015.
- [39] P. Hingwe and M. Tomizuka, "Modeling and Robust Control of Power Steering System of Heavy Vehicles for AHS," in *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*, (Hawaii, USA), pp. 1365 – 1370, Aug. 1999.
- [40] S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "Combined Longitudinal and Lateral Control of a Platoon of Vehicles," in *American Control Conference, 1992*, (Chicago, IL, USA), pp. 1763–1767, June 1992.
- [41] M. Doumiati, O. Sename, J. Martinez, and L. Dugard, "Vehicle yaw control via coordinated use of steering/braking systems," in *the 18th IFAC World Congress*, (Milano, Italy), pp. 644–649, 2011.
- [42] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, "High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding : Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks," *Autonomous Robots*, vol. 21, pp. 79–97, June 2006.

- [43] M. Alain and S. Claude, "Trajectory tracking for unicycle-type and two-steering-wheels mobile robots," Tech. Rep. No. 2097, INRIA, Sophia-Antipolis, France, 1993.
- [44] H. Pham, M. Tomizuka, and J. K. Hedrick, "Integrated Maneuvering Control for Automated Highway Systems Based on a Magnetic ReferenceEensing System," Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-97-28, Institute of transportation studies, university of California, Berkeley, California, 1997.
- [45] R. Rajamani, H. shue Tan, B. K. Law, and W. bin Zhang, "Demonstration of Integrated Longitudinal and Lateral Control for the Operation of Automated Vehicles in Platoons," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 695–708, 2000.
- [46] P. Daviet, M. Parent, and L. C. Cedex, "Longitudinal and Lateral Servoing of Vehicles in a Platoon," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (Tokyo), pp. 41 – 46, Sept. 1996.
- [47] N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet, "A Tire Stiffness Backstepping Observer Dedicated to All-Terrain Vehicle Rollover Prevention," *Advanced Robotics*, vol. 22, pp. 1267–1285, Jan. 2008.
- [48] U. Kiencke and A. Daiß, "Observation of lateral vehicle dynamics," *Control Engineering Practice*, vol. 5, no. 8, pp. 1145–1150, 1997.
- [49] R. Pepy, A. Lambert, and H. Mounier, "Path Planning using a Dynamic Vehicle Model," in *Information and Communication Technologies, ICTTA 06*, no. 1, (Damascus), pp. 781 – 786, 2006.
- [50] B. C. Z. Jiao, "Adaptive Path Following Control of Car-like Mobile Robot using Dynamic Model," in *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, (Beijing, China), pp. 239–244, June 2011.
- [51] E. N. Moret, *Dynamic Modeling and Control of a Car-Like Robot*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [52] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, "Adaptive and predictive non linear control for sliding vehicle guidance : application to trajectory tracking of farm vehicles relying on a single RTK GPS," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, vol. 1, (Sendai, Japan), pp. 455–460, Oct. 2004.
- [53] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, "Model Predictive Control for vehicle guidance in presence of sliding : Application to farm vehicles path

- tracking,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Barcelona, Spain), pp. 885–890, Apr. 2005.
- [54] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, “Motion planner and lateral-longitudinal controllers for autonomous maneuvers of a farm vehicle in headland,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (St Louis, USA), pp. 5782–5787, Oct. 2009.
- [55] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, “Sideslip angles observer for vehicle guidance in sliding conditions : Application to agricultural path tracking tasks,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Orlando, Florida), pp. 3183–3188, 2006.
- [56] R. Lenain, B. Thuilot, O. Hach, and P. Martinet, “High-speed mobile robot control in off-road conditions : a multi-model based adaptive approach,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (Shanghai), pp. 6143–6149, May 2011.
- [57] P. Cartade, J. B. Braconnier, R. Lenain, and B. Thuilot, “Adaptive and predictive control of a mobile robots fleet : Application to off-road formation regulation,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (Karlsruhe, Germany), pp. 1836–1842, 2013.
- [58] A. Guillet, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet, “Adaptable Robot Formation Control : Adaptive and Predictive Formation Control of Autonomous Vehicles,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 21, pp. 28–39, 2014.
- [59] R. Desantis, “Path-tracking for car-like robots with single and double steering,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 2, pp. 366–377, 1995.
- [60] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet, “A Global Control Strategy for Urban Vehicles Platooning relying on Nonlinear Decoupling Laws,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS’05*, (Edmonton, Canada), pp. 2875 – 2880, Aug. 2005.
- [61] J. Courbon, Y. Mezouar, and P. Martinet, “Autonomous Navigation of Vehicles from a Visual Memory Using a GenericCameraModel,” *IEEE Trans On Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, pp. 392–402, 2009.
- [62] J. M. F. Thuilot B. Bom and P. Martinet, “Accurate automatic guidance of an urban electric vehicle relying on a kinematic GPS sensor,” in *5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV’04)*, (Lisboa, Portugal), July 2004.

- [63] W. Wijesoma, K. Kodagoda, and E. Teoh, "Uncoupled fuzzy controller for longitudinal and lateral control of a golf car-like AGV," in *International Conference on Intelligent Transportation Systems*, (Singapore), pp. 142–147, 1999.
- [64] K. R. S. Kodagoda, W. S. Wijesoma, and E. K. Teoh, "Fuzzy speed and steering control of an AGV," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 112–120, 2002.
- [65] D. Swaroop, "String Stability Of Interconnected Systems : An Application To Platooning In Automated Highway Systems," Tech. Rep. UCB-ITS-PRR-97-14, Institute of transportation studies university of California. Berkeley, California, 1997.
- [66] G. Lee, S. Kim, Y. Yim, J. Jung, S. Oh, and B. Kim, "Longitudinal and lateral control system development for a platoon of vehicles," in *Proceedings IEEE/IEEE-J/JSIAI International Conference on Intelligent Transportation Systems*, (Pohang, South Korea), pp. 605–610, 1999.
- [67] A. Glumineau, *Introduction à la commande robuste des systemes linéaire*. Lecture 09, Ecole Centrale de Nantes ECN, 2013.
- [68] J. Hedrick and A. Girard, *Control of Nonlinear Dynamic Systems : Theory and Applications*. Lecture 001, Berkeley University of California, 2010.
- [69] J. Eyre, D. Yanakiev, and I. Kanellakopoulos, "A Simplified Framework for String Stability Analysis of Automated Vehicles," *Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, pp. 375–405, 1998.
- [70] S. K. Gehrig and F. J. Stein, "Elastic bands to enhance vehicle following," in *IEEE Proceedings on Intelligent Transportation Systems*, pp. 597–602, 2001.
- [71] S. Y. Yi and K. T. Chong, "Impedance control for a vehicle platoon system," *Mechatronics*, vol. 15, no. 5, pp. 627–638, 2005.
- [72] J.-M. Contet, *Modèles Multi-Agents Réactifs Pour La Navigation Multi - Véhicules : Spécification Formelle et Vérification*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009.
- [73] P. Seiler, A. Pant, and K. Hedrick, "Disturbance propagation in vehicle strings," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 10, pp. 1835–1841, 2004.
- [74] F. Gechter, V. Chevrier, and F. Charpillet, "A reactive multi-agent system for localization and tracking in mobile robotics," in *16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, (Nancy, France), pp. 431–435, Nov. 2004.

- [75] J.-m. Contet, F. Gechter, P. Gruer, and A. Koukam, "Multiagent System Model for Vehicle Platooning with Merge and Split Capabilities," in *3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents (ICARA)*, (Palmerston North, New Zealand), pp. 12–14, 2006.
- [76] M. El-Zaher, F. Gechter, P. Gruer, and M. Hajjar, "A new linear platoon model based on reactive multi-agent systems," in *International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI*, (Boca Raton, FL), pp. 898–899, Nov. 2011.
- [77] J. M. Contet, F. Gechter, P. Gruer, and A. Koukam, "Bending virtual spring-damper : A solution to improve local platoon control," in *Computational Science (ICCS), Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5544, pp. 601–610, 2009.
- [78] J.-M. Contet, F. Gechter, P. Gruer, and A. Koukam, "Application of Reactive Multiagent System to Linear Vehicle Platoon," in *19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, (Patras), pp. 67–70, IEEE, Oct. 2007.
- [79] M. E. Khatir and E. J. Davison, "Decentralized control of a large platoon of vehicles using non-identical controllers," in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 3, (Boston, MA, USA), pp. 2769 –2776, July 2004.
- [80] C. W. Reynolds, "Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model," in *SIGGRAPH '87 Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, (New York, NY, USA), pp. 25–34, 1987.
- [81] E. Onieva, D. A. Pelta, J. Alonso, V. Milanese, and J. Perez, "A modular parametric architecture for the TORCS racing engine," in *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games (CIG)*, (Milano, Italy), pp. 256–262, Sept. 2009.
- [82] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, "Dynamiques latérale et longitudinale découplées pour la commande d'un convoi urbain avec des distances inter-véhicules variables et minimisées," in *8th National Conference on Control Architectures of Robots, CAR13*, (Angers, France), June 2013.
- [83] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, "Safe highways platooning with minimized inter-vehicle distances of the time headway policy," in *5th IROS Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles , PPNIV13*, (Tokyo, Japan), Nov. 2013.
- [84] A. Ali, G. Garcia, and P. Martinet, "Modified flatbed tow truck model for stable and safe platooning in presences of lags, communication and sensing delays," in *6th IROS14 Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles , PPNIV14*, no. 1, (Chicago, USA), Sept. 2014.

- [85] R. Horowitz and P. Varaiya, "Control design of an automated highway system," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 7, pp. 913–925, 2000.
- [86] W. Ren and R. W. Beard, "Decentralized Scheme for Spacecraft Formation Flying via the Virtual Structure Approach," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 27, no. 1, pp. 73–82, 2004.
- [87] A. Benzerrouk, L. Adouane, and P. Martinet, "Stable navigation in formation for a multi-robot system based on a constrained virtual structure," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 12, pp. 1806–1815, 2014.
- [88] D. Scharf, F. Hadaegh, and S. Ploen, "A survey of spacecraft formation flying guidance and control. Part II : control," in *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 4, (Boston, Massachusetts), pp. 2976 – 2985, July 2004.
- [89] P. Avanzini, B. Thuilot, E. Royer, and P. Martinet, "A global decentralized control strategy for urban vehicle platooning relying solely on monocular vision," in *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV*, (Hanoi Vietnam), pp. 2–7, Dec. 2008.
- [90] S. Sheikholeslam and C. a. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information : A system level study," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 546–554, 1993.
- [91] R. Teo, D. M. Stipanović, and C. J. Tomlin, "Decentralized spacing control of a string of multiple vehicles over lossy datalinks," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 469–473, 2010.
- [92] P. Avanzini, *Modélisation et Commande d'un Convoi de Véhicules Urbains par Vision*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2010.
- [93] K. Bouibed, *Contribution à la Gestion de Défaillances d ' un Train de Véhicules Electriques Légers Autonomes*. PhD thesis, Université Lille, 2010.
- [94] P.-E. Dumont, *Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation*. PhD thesis, Université Lille 1 Sciences et Technologies, 2006.
- [95] M. E. Zaher, *Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification*. PhD thesis, l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2013.
- [96] J. Yazbeck, *Accrochage immatériel sûr et précis de v éhicules automatiques*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2014.

- [97] M. Marouf, E. Pollard, and F. Nashashibi, "Automatic parallel parking and platooning to redistribute electric vehicles in a car-sharing application," in *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, (Dearborn, MI), pp. 486 – 491, June 2014.
- [98] M. Y. Abualhoul, M. Marouf, O. Shagdar, and F. Nashashibi, "Platooning control using visible light communications : A feasibility study," in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems-(ITSC)*, (The Hague, Netherlands), pp. 1535–1540, Oct. 2013.
- [99] M. Abualhoul, M. Marouf, O. Shag, and F. Nashashibi, "Enhancing the field of view limitation of Visible Light Communication-based platoon," in *IEEE 6th International Symposium on Wireless Vehicular Communications (WiVeC)*, (Vancouver, BC), pp. 1 – 5, Sept. 2014.
- [100] "Advanced Vehicle Control Systems (AVCS) Mobility 2000," tech. rep., 1990.
- [101] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "Variable Time Headway for String Stability of Automated Heavy-Duty Vehicles," in *Proceedings of 34th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 4077–4081, 1995.
- [102] P. A. Ioannou and C. C. Chien, "Autonomous intelligent cruise control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, pp. 657–672, Nov. 1993.
- [103] P. Avanzini, B. Thuilot, and P. Martinet, "Accurate platoon control of urban vehicles, based solely on monocular vision," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference*, (Taipei, Taiwan), pp. 6077–6082, 2010.
- [104] D. Swaroop and J. K. Hedrick, "Constant Spacing Strategies for Platooning in Automated Highway Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 121, p. 462, 1999.
- [105] L. Xiao, S. Darbha, and F. Gao, "Stability of string of adaptive cruise control vehicles with parasitic delays and lags," in *Proceedings IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (Beijing, China), pp. 1101–1106, 2008.
- [106] D. Swaroop and K. Rajagopal, "A review of constant time headway policy for automatic vehicle following," in *Proceedings on IEEE Intelligent Transportation Systems*, (Oakland, CA), pp. 65–69, Aug. 2001.
- [107] X. Hupp, J. D. Lafontaine, and M. Beauregard, "Guidance and Control of a Platoon of Vehicles Adapted to Changing Environment Conditions," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3091 – 3096, 2003.

- [108] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "A Simplified Framework For String Stability Analysis In AHS," in *Proceedings Of The 13th IFAC World Congress*, pp. 177–182, 1996.
- [109] D. Swaroop, J. K. Hedrick, c. C. Chien, and P. Ioannou, "A Comparision of Spacing and Headway Control Laws for Automatically Controlled Vehicles¹," *Vehicle System Dynamics*, vol. 23, no. 1, pp. 597–625, 1994.
- [110] Y. Kanayama, Y. Kimura, and T. Noguchi, "A stable tracking control for an autonomous mobile robot," in *IEEE International Conference Robot Automation*, pp. 384–389, 1990.
- [111] C. C. de Wit, H. Khenouf, C. Samson, and O. Sordalen, "Nonlinear control design for mobile robots," in *Recent trends in mobile robots, World Scientific*, (Singapore), pp. 121–156, 1993.
- [112] C. Samson, "Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots," *International Journal Robotics Res.*, vol. 12, no. 1, 1993.
- [113] D. W. D. Wang and C. B. L. C. B. Low, "Modeling and Analysis of Skidding and Slipping in Wheeled Mobile Robots : Control Design Perspective," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 676–687, 2008.
- [114] M. S. Kim, J. H. Shin, S. G. Hong, and J. J. Lee, "Designing a robust adaptive dynamic controller for nonholonomic mobile robots under modeling uncertainty and disturbances," *Mechatronics*, vol. 13, pp. 507–519, 2003.
- [115] M. O. M. Oubbati, M. Schanz, and P. Levi, "Kinematic and dynamic adaptive control of a nonholonomic mobile robot using a RNN," in *International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 27–33, 2005.
- [116] M. M. Barash, *Neural Dynamics for Mobile Robot Adaptive Control*. PhD thesis, University of Stuttgart, June 2006.
- [117] J. Wang, C.-Y. Su, and M. Oya, "Robust motion tracking control of partially nonholonomic mechanical systems," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04)*, vol. 5, (New Orleans, LA, USA), pp. 4608–4613, May 2004.
- [118] A. Albagul and W. Wahyudi, "Dynamic modeling and adaptive traction control for mobile robots," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 149–154, 2004.

- [119] J. Ryu, E. Rossetter, and J. Gerdes, "Vehicle sideslip and roll parameter estimation using GPS," in *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, (Hiroshima, Japan), pp. 373–380, 2002.
- [120] R. Anderson and D. Bevly, "Estimation of tire cornering stiffness using GPS to improve model based estimation of vehicle states," in *IEEE Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium*, (Las Vegas, Nevada, USA), pp. 801–806, June 2005.
- [121] C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, and M. Berducat, "Automatic Guidance of a Four-Wheel-Steering Mobile Robot for Accurate Field Operations," *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 6-7, pp. 504–518, 2009.
- [122] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, "Multi-models based sideslip angles observer : Accurate control of high-speed mobile robots in off-road conditions," in *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (St. Louis, MO, USA), pp. 1197 – 1202, Oct. 2009.
- [123] A. Bose and P. Ioannou, "Analysis of Traffic Flow With Mixed Manual and Intelligent Cruise Control Vehicles : Theory and Experiments," *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 4, no. 4, pp. 173–188, 2001.
- [124] C.-Y. Liang and H. Peng, "String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles.," *JSME International Journal Series C*, vol. 43, pp. 671–677, 2000.
- [125] L. Xiao and F. Gao, "Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, pp. 1184–1194, Dec. 2011.
- [126] P. A. Cook, "Stable Control of Vehicle Convoys for Safety and Comfort," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 3, pp. 526–531, 2007.
- [127] B. K. Horn, "Suppressing traffic flow instabilities," in *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 13–20, 2013.
- [128] Y. Zhang, E. B. Kosmatopoulos, P. a. Ioannou, and C. C. Chien, "Autonomous intelligent cruise control using front and back information for tight vehicle following maneuvers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 301–318, 1999.
- [129] P. Li, L. Alvarez, and R. Horowitz, "AHS safe control laws for platoon leaders," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 614–628, 1997.

- [130] A. Scheuer, O. Simonin, and F. Charpillet, "Safe longitudinal platoons of vehicles without communication," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 70–75, 2009.
- [131] P. Taylor, L. Alvarez, and R. Horowitz, "Safe Platooning in Automated Highway Systems Part II : Velocity Tracking Controller Luis," *Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 32, no. 1, pp. 57–84, 1999.
- [132] P. Taylor, L. Alvarez, and R. Horowitz, "Safe Platooning in Automated Highway Systems Part I : Safety Regions Design," *Vehicle System Dynamics : International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 32, no. 1, pp. 23–55, 1999.
- [133] J. Wang, X. Wu, and Z. Xu, "Potential-based obstacle avoidance in formation control," *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 6, no. 3, pp. 311–316, 2008.
- [134] C. De La Cruz and R. Carelli, "Dynamic model based formation control and obstacle avoidance of multi-robot systems," *Robotica*, vol. 26, no. 03, 2008.
- [135] A. Ferrara and C. Vecchio, "Collision avoidance strategies and coordinated control of passenger vehicles," *Nonlinear Dynamics*, vol. 49, pp. 475–492, Sept. 2007.
- [136] AASHTO, "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets," tech. rep., Washington, DC, 2001.
- [137] D. Godbole and J. Lygeros, "Longitudinal Control of the Lead Car of a Platoon," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 4, pp. 1125–1135, 1993.
- [138] D. Yanakiev and I. Kanellakopoulos, "Longitudinal Control of Automated CHVs with Significant Actuator Delays," vol. 50, no. 5, pp. 1289–1297, 2001.
- [139] X. Ling-yun and G. Feng, "Effect of information delay on string stability of platoon of automated vehicles under typical information frameworks," *Journal of central South University of Technology*, vol. 17, pp. 1271–1278, Dec. 2010.
- [140] X. Liu, A. Goldsmith, S. Mahal, and J. Hedrick, "Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons," in *Proceedings IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (Oakland, CA), pp. 625–630, Aug. 2001.
- [141] L. Xiao, F. Gao, and J. Wang, "On scalability of platoon of automated vehicles for leader-predecessor information framework," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (Xi'an), pp. 1103–1108, June 2009.

-
- [142] K. Mizui, M. Uchida, and M. Nakagawa, “Vehicle-to-vehicle 2-way communication and ranging system using spread spectrum technique : proposal of double boomerang transmission system,” in *Proceedings of VNIS'94-Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, (Yokohama), pp. 153 – 158, 1994.
- [143] J. Doyle, B. Francis, and A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*. Macmillan Publishing Co., 1990.
- [144] M.Vidyasagar and C.A.Desoerm, *Feedback Systems : Input–Output Properties*. Academic Press, 1975.

Thèse de Doctorat

Alan ALI

Modélisation et commande d'un convoi de véhicules urbains

Modeling and control of a platoon of urban autonomous vehicles

Résumé

La conduite de véhicules automatisés en convoi est une voie prometteuse pour réduire la congestion du trafic, car elle permet de diminuer les distances inter-véhicules et d'améliorer la sécurité routière.

Les stratégies les plus répandues pour la commande longitudinale en convoi sont l'espacement variable et l'espacement constant. Pour la stratégie d'espacement variable, la stabilité du convoi peut être assurée en utilisant des capteurs embarqués, mais les distances inter-véhicules peuvent devenir très grandes à vitesse élevée. La stratégie d'espacement constant entre les véhicules peut assurer la stabilité du convoi avec une densité de trafic élevée, mais elle requiert un système de communication très fiable, faute de quoi le convoi peut devenir instable.

Dans cette thèse, une nouvelle loi de commande qui cumule les avantages des deux stratégies précédentes est proposée. Un modèle original pour la dynamique longitudinale du convoi est développé. Ce modèle permet de découpler la dynamique "lente" du convoi de la dynamique "rapide" des véhicules. Ceci permet de diminuer largement les distances inter-véhicules, en conservant la stabilité, la sécurité et la robustesse. Il suffit pour cela de partager une seule information entre les véhicules, à un faible débit. Ce modèle général permet de retrouver les autres lois importantes, et de basculer de l'une à l'autre selon la disponibilité de la communication. La robustesse de la loi de commande proposée est vérifiée en trouvant les conditions de stabilité et de sécurité des convois homogènes et non-homogènes en présence de retards non-identiques, d'actionnement, de capteurs et de communication (contrairement à ce qui a déjà été montré dans la littérature).

La vérification, de la stabilité et de la sécurité en prenant en compte des scénarios critiques, a été faite par simulation. Les bons résultats obtenus montrent l'efficacité de la loi de commande proposée.

Mots clés

Commande, Convoi, Stabilité, Sécurité, Robustesse, Commande latérale, Commande longitudinale

Abstract

Moving automated vehicles in platoon seems to be a promising idea to reduce traffic congestion, because it reduces the inter-vehicles distances and improves transport safety.

Variable spacing and constant spacing are the two policies for the longitudinal control of platoons. In variable spacing, a stable platoon can be obtained using on-board information only. However, inter-vehicle distances are very large, and hence traffic density is low. Constant spacing offers string stability with high traffic density, but stability requires reliable communication between the vehicles.

A new model and control law are proposed for the longitudinal dynamics of the platoon. The new model enables decoupling the "slow" dynamics of the platoon as a whole from the "fast" dynamics of inter-vehicle movements. This widely reduces the distances between vehicles, while maintaining stability, security and robustness. It only requires sharing one information between the vehicles at a low rate. It also represents a general law, from which we can derive other important laws, and provides a framework which allows smooth switching between these laws according to communication capability without losing stability. The robustness of the proposed control law has been established by finding the conditions of string stability. The security of homogeneous and non-homogeneous platoons in the presences of non-identical delays (lags, sensing and communications delays) have been proved, thus correcting previous statements found in the literature.

The verification was done in simulation. Stability and safety were checked in critical scenarios. The good results prove the efficiency of the proposed control law.

Key Words

Control, Platoon, Stability, Safety, Robust control, Lateral control, Longitudinal control